

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

А. Г. ТРУЩЕВ

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов архитектурных специальностей вузов



МОСКВА
СТРОИИЗДАТ
1983

Рецензенты: кафедра архитектурных конструкций (канд. техн. наук, проф. Ю. Л. Сополько), кафедра инженерных конструкций (канд. техн. наук, проф. В. К. Файбишенко) Московского ордена Трудового Красного Знамени архитектурного института; кафедра металлических конструкций (д-р техн. наук, проф. Н. М. Кирсанов) Воронежского инженерно-строительного института

Трущев А. Г.

Т 80 Пространственные металлические конструкции:
Учсб. пособие для вузов. — М.: Стройиздат, 1983. —
215 с., ил.

Изложены сведения о конструктивных решениях различных пространственных металлических покрытий зданий и основные положения о приближенном расчете вантовых, мембранных и решетчатых конструкций. Приведены справочные данные для проектирования пространственных металлических покрытий.

Для студентов архитектурной специальности (1201) высших учебных заведений.

Т 3202000000—246
047(01)—83 38—83

ББК 38.54
6С4.05

Решениями XXVI съезда КПСС предусматривается повысить уровень индустриализации строительного производства и степень заводской готовности конструкций и деталей, расширить применение новых эффективных конструкций, наращивать выпуск прогрессивных металлических конструкций. В этой связи при подготовке специалистов архитектурного профиля значение пространственных металлических конструкций становится особенно заметным.

Настоящее учебное пособие по пространственным металлическим конструкциям для студентов архитектурной специальности 1201 высших учебных заведений соответствует программе курса «Конструкции зданий и сооружений», утвержденной 10 сентября 1979 г. Учебно-методическим управлением по высшему образованию Минвуза СССР, и раскрывает роль рассматриваемых конструкций в выполнении намеченных партий и правительством задач в области строительства на одиннадцатую пятилетку и на последующий период.

В методическом отношении учебное пособие учитывает специфику преподавания курса в части архитектурных и инженерных конструкций для студентов специальности «Архитектура»: при наиболее полном изложении различных приемов решения пространственных металлических покрытий для большепролетных сооружений расчеты конструкций изложены с максимально возможными упрощениями, в доступной форме раскрывающими напряженное состояние всех несущих элементов.

Материал учебного пособия систематизированно и компактно охватывает конструктивные решения различных типов вантовых, мембранных, перекрестно-стержневых и сетчатых покрытий. Из научно-методических соображений пособие не только освещает опыт проектирования прогрессивных конструкций, но и последовательно направляет студента архитектурной специальности на изучение пространственных покрытий и дальнейшее развитие их архитектурно-конструктивных форм.

Учебное пособие состоит из двух разделов с делением их на 13 глав. При этом пособие включает такой материал, который в остальных учебниках или учебных пособиях раскрыт минимально или вообще отсутствует. В пособии приведены примеры расчетов основных типов пространственных металлических конструкций, что позволяет студенту в ходе учебного процесса проектировать практически любое большепролетное покрытие.

Изложенный в пособии материал основан на действующих строительных нормах и правилах. В расчетах конструкций применена Международная система физических единиц СИ согласно стандарту Совета Экономической Взаимопомощи СТ СЭВ 1052-78 «Метрология. Единицы физических величин» и Перечню единиц физических величин, подлежащих применению в строительстве (СИ 528-80).

При подготовке книги учтены замечания и рекомендации, высказанные при рецензировании профессорами Н. М. Кирсановым, Ю. Л. Сопочко и В. К. Файбишенко, которым автор выражает глубокую признательность.

Глава I. Общие сведения

В висячих конструкциях покрытий основными несущими элементами, перекрывающими пролет, являются гибкие стальные нити или тонколистовые металлические мембраны. Эти покрытия получили широкое распространение при строительстве зданий с большими пролетами: спортивных залов, стадионов, выставочных павильонов, кинотеатров, торговых залов, цирков, рынков, аэровокзалов, гаражей, производственных цехов и т. д.

Вантовые и мембранные покрытия выгодно отличаются от традиционных стальных конструкций. К их основным достоинствам относятся следующие:

в расставленных элементах эффективно используется вся площадь сечения вант или листов и применяются высокопрочные стали, что обеспечивает малую массу несущей конструкции;

при монтаже покрытия, как правило, не требуются леса и подмости, что упрощает возведение покрытия;

ванты, свернутые в бухты, или тонколистовые ленты свернутые в рулоны, обеспечивают хорошую транспортабельность покрытия;

с увеличением перекрываемого пролета экономичность покрытия возрастает, поскольку масса несущей конструкции остается относительно малой;

своеобразные конструктивные формы покрытия позволяют повышать эстетическую выразительность сооружения;

в большинстве случаев благодаря своей форме висячие покрытия создают в здании наиболее благоприятные условия акустики, видимости, освещенности.

Висячим покрытиям присущи и некоторые конструктивные недостатки, обусловленные спецификой распорных систем и высокопрочности материалов несущих элементов:

повышенная деформативность покрытий, которая вызывается тем, что ванты или мембраны могут изменять свою начальную геометрическую форму. Для обеспечения жесткости покрытия приходится применять дополнительные конструктивные мероприятия. В этом смысле недостаток можно рассматривать как особенность висячего покрытия;

необходимость устраивать специальную опорную конструкцию для восприятия распора от вант или мембраны, что увеличивает стоимость покрытия;

трудность в отдельных случаях отвода воды с покрытия.

В заключение следует отметить, что преимущества висячих покрытий доминируют над недостатками, чем объясняется все более широкое распространение этих конструкций.

Висячие системы для покрытий зданий впервые были предложены выдающимся русским инженером и ученым В. Г. Шуховым (1853—1939 гг.). Он спроектировал и осуществил в 1896 г. покрытия инженерно-строительных павильонов Всероссийской художе-

ственной и промышленной выставки в Нижнем Новгороде (рис. 1.1). Пространственная сетка этих покрытий представляла собой поверхность однополостного гиперболоида и была выполнена из взаимно пересекающихся леит полосовой стали. Павильон круглой формы (рис. 1.1, а) имел диаметр наружного кольца 68 м, павильон овальной формы (рис. 1.1, б) был выполнен размером 98×51 м.

Долгое время в строительстве всякие покрытия не применяли. Опасения сводились к тому, что свойства таких покрытий недостаточно изучены, отсутствуют надежные методы расчета. В 1950 г. архитектор Новицкий впервые разработал покрытие в виде ортогональной вантовой сети и в 1952 г. по его проекту в США в г. Рэлей (штат Северная Каролина) был перекрыт спортивный зал размером в плане 97×92 м (рис. 1.2.). Конструкция покрытия состоит из двух наклонных железобетонных арок параболического очертания, между которыми натянуты продольные и поперечные стальные канаты. Небольшая собственная масса покрытия (около 30 кг на 1 м^2), низкая стоимость сооружения и выразительность седлообразной формы поверхности привлекли внимание архитекторов многих стран. Такая форма покрытия нашла широкое применение в общественных сооружениях, в том числе и в СССР (киноконцертный зал «Украина» в Харькове, певческая эстрада в Таллине, летний кинотеатр в Баку, эстрада в Паланге и др.).

В 1953 г. по проекту архитектора Шеллинга был перекрыт зрелищный зал в г. Карлсруэ (ФРГ). В плане зал имеет эллиптическую форму с размерами по осям $75,5 \times 48,6$ м. Покрытие решено с наружным опорным кольцом, изогнутым в вертикальной плоскости на 5 м и опирающимся на железобетонные стойки. Вантовая сеть образует седлообразную форму покрытия; по большой оси канаты провисают, в поперечном направлении они имеют обратную кривизну (рис. 1.3). В нашей стране подобная система покрытия применена в цирках, построенных в гг. Куйбышеве, Новосибирске, Донецке, Уфе, Кривом Руге, Перми, Ворошиловграде (см. рис. IV.3).

Первое вогнутое радиальное покрытие появилось в 1956 г. Оно было применено по проекту архитектора Риоса в Монтевидео (Уругвай) для стадиона круглой формы в плане диаметром 94 м. Жесткость покрытия была обеспечена предварительным напряжением кровли путем временного пригруза железобетонных плит кирпичом.

В 1958 г. на Всемирной выставке в Брюсселе по проекту архитектора Стоуна павильон США был перекрыт двухлопастной радиальной вантовой системой. В плане павильон имел круглое очертание диаметром 104 м. Система стальных канатов передавала распор на наружное кольцо и центральный барабан диаметром 20 м и высотой 8,5 м.

После первого применения висячих покрытий прошло около трех десятилетий. За это время они все шире и шире внедрялись в строительную практику. Следует отметить, что стремление использовать

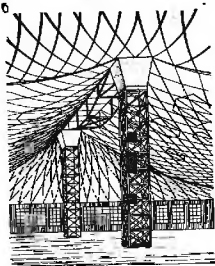


Рис. 1.1. Павильоны на Всероссийской художественной и промышленной выставке в Иижне (1922 г.)

а — с круглым планом; б — с планом овальной формы

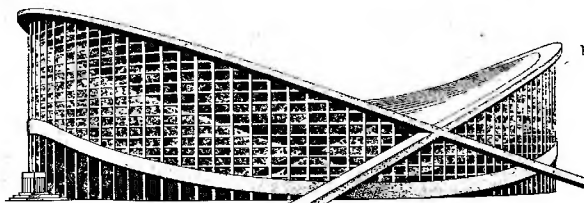


Рис. 1.2. Спортивный зал в г. Рэлей (США, 1952 г.)

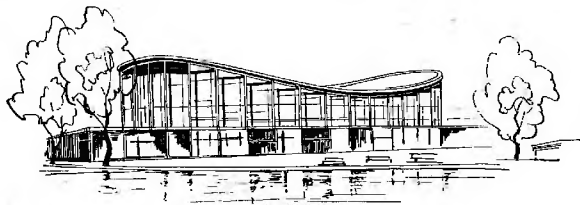


Рис. 1.3. Зрелищный зал в г. Карлсруэ (ФРГ, 1953 г.)

положительные свойства висячих покрытий, поиски архитектурного образа, решение различных проблем проектирования и возведения покрытий привели к быстрому развитию типов этих конструкций. В настоящее время различные системы покрытий позволили создать весьма выразительные и оригинальные произведения современной архитектуры.

В литературе имеются различные предложения по классификации покрытий, которые охватывают различные признаки: геометрию поверхности, форму сооружения в плане, конструктивную схему вант, материал покрытия, характер обеспечения жесткости и т. п. Поскольку практически любое висячее покрытие состоит из пролетной части и опорного контура, то целесообразно делить покрытия в зависимости от конструктивных и статических особенностей на следующие основные схемы: висячие оболочки, вантовые покрытия, висячие фермы и балки, мембраны, комбинированные системы, подвесные конструкции.

Висячие оболочки образуются путем укладки на ванты железобетонных, армоцементных или керамзитобетонных плит с последующим замоноличиванием швов вместе с вантами для обеспечения жесткости покрытия. Висячие оболочки образуются также при укладке монолитного бетона по вантам. По конструктивному решению все висячие оболочки являются однопоясными системами и имеют плоский опорный контур. Ванты в таких покрытиях располагают параллельно или радиально, в отдельных случаях возможно применение пересекающихся вант в виде провисающей сети.

Вантовыми считают такие покрытия, в которых жесткость обеспечивается путем использования системы несущих и стабилизирующих вант, образующих двухпоясную конструкцию или сеть. Вантовая сеть всегда имеет поверхность отрицательной гауссовой кривизны. Вантовое покрытие может быть выполнено из нитей, натянутых как струны. После укладки элементов кровли вантовая система, как правило, продолжает работать без обеспечения совместной работы ограждающих элементов между собой и с опорным контуром. В висячей оболочке вантовую схему используют как промежуточную стадию при строительстве.

Висячие фермы и балки представляют собой жесткие вянты. Их используют для стабилизации покрытий с легкой кровлей.

Мембраны являются висячими оболочками, в которых пролетная несущая конструкция выполнена из тонколистового металла (стали или алюминиевого сплава).

Комбинированные системы состоят из гибких вант и жестких элементов. Жесткие элементы применяют для стабилизации формы покрытия и распределения сосредоточенных и неравномерных нагрузок на несколько несущих вант.

Подвесные конструкции образуют комбинацией внешних тросов и жестких балок или ферм.

На основании изложенных выше отличительных признаков основных схем висячих покрытий в настоящем учебном пособии предлагается такое деление покрытий для последующего рассмотрения их конструктивных решений:

- висячие оболочки с параллельными вантами;
- висячие оболочки с радиальными вантами;
- двухпоясные покрытия с параллельными вантами;
- двухпоясные покрытия с радиальными вантами;
- покрытия с вантовыми сетями;

струнные покрытия;
покрытия с висячими фермами и балками (жесткими вантами);
мембранные покрытия;
комбинированные системы покрытий;
подвесные покрытия.

Материалом для вант в висячих покрытиях служит сталь, которую применяют в виде канатов, арматурных стержней и пучков из высокопрочной проволоки.

Для сравнительно небольших пролетов используют ванты из арматурной стали периодического профиля классов А-III и А-IV. Максимальный диаметр стержневой арматуры для вант ограничен 40 мм. Сортамент горячекатаной арматурной стали приведен в прил. 12.

Весьма широкое применение для вант получили канаты. Отечественная промышленность выпускает стальные канаты следующих видов: одинарной свивки (пряди, или спиральные); двойной свивки (тросовые), т. е. проволоки скручены в пряди, а пряди — в канаты; многократной свивки (кабельтовые). Для висячих покрытий в основном используют канаты одинарной и двойной свивки, сортамент их указан в прил. 13. В канатах с точечным касанием проволок (ТК) угол наклона свивки по слоям постоянный, поэтому шаг свивок по слоям разный и проволоки в них касаются одна другой в отдельных точках. В канатах с линейным касанием проволок (ЛК) шаг свивки во всех слоях пряди одинаковый. Эта особенность отражается на жесткости канатов: канаты типа ЛК являются более гибкими по сравнению с канатами типа ТК.

Канаты изготавливают из высокопрочной проволоки с временным сопротивлением разрыву 1176, 1274, 1372, 1470, 1568, 1666, 1764, 1862 и 1960 МПа. Разрывное усилие каната меньше суммарного разрывного усилия проволок. В зависимости от конструкции каната эти потери составляют: 15—19% — для канатов типа ТК конструкции 1×37 и типа ЛК-Р конструкции 6×19; 20—25% для канатов типа ТЛК-РО конструкции 6×36. Витая структура каната снижает и первоначальный модуль упругости каната при одинарной свивке на 15—35% и при двойной свивке на 50—65%.

Для устранения неупругих деформаций и повышения первоначального модуля упругости канаты необходимо подвергать предварительной вытяжке в течение примерно 2 ч с нагрузкой 65—75% разрывного усилия. После вытяжки модуль упругости для закрытых спиральных канатов составляет 167 ГПа, для спиральных канатов с металлическим сердечником — 147 ГПа и канатов с органическим сердечником — 127 ГПа.

Для вант из пучков используют высокопрочную проволоку, гладкую или периодического профиля диаметром 4—6 мм. Проволока меньших диаметров интенсивнее подвергается коррозии, проволока больших диаметров труднее поддается обработке и имеет меньшие значения расчетного сопротивления.

§ II.1. ПОКРЫТИЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВАНТАМИ

Покрытия с параллельно расположенными¹ вантами, как правило, применяют для прямоугольных в плане зданий. В этом случае достигается простота конструктивного решения и возникает возможность возведения здания в несколько очередей по длине. Основные конструктивные приемы устройства висячих оболочек с параллельно расположенными вантами приведены на рис. II.1.

При вантовой схеме покрытие получается очень деформативным, поэтому для повышения его жесткости и предупреждения разрывов гидроизоляционного ковра используют достаточно тяжелые плиты кровли и их включают в общую работу покрытия. Для уменьшения деформативности покрытия применяют один из следующих способов предварительного напряжения.

1. Замоноличивание швов после монтажа вант, плит кровли и временного пригруза покрытия, равного массе утеплителя, кровли и снега. Пригруз размещают на плитах или подвешивают снизу к вантам. После приобретения бетоном достаточной прочности пригруз снимают.

2. Натяжение домкратами вант с одного конца по окончании монтажа вант, укладки плит кровли, замоноличивания стыков и приобретения бетоном необходимой прочности. Ванты размещают в специальных каналах, которые после натяжения вант инъецируются цементным раствором.

3. Замоноличивание швов между плитами бетоном на натягающем цементе (НЦ-40) после монтажа всех элементов покрытия. Замоноличивание швов выполняют непрерывным бетонированием.

4. Укладка бетона на натягающем цементе (НЦ-20) по опалубке, подвешенной к вантам. Бетонируют полосами длиной на весь пролет оболочки с оставлением швов. По окончании бетонирования швы между полосами одновременно заливают (см. рис. II.9, б).

Помимо указанных способов предварительного напряжения возможно простое утяжеление покрытия, когда масса железобетонных плит оказывается достаточной для обеспечения устойчивости висячей оболочки при действии ветрового отсоса. С характером и значением ветровой нагрузки на вогнутое покрытие можно ознакомиться по Справочнику проектировщика [34, с. 337].

Провисание вант f задают в пределах $1/10$ — $1/25$ пролета. Из соображений ограничения объема здания, занимаемого покрытием, целесообразно назначать меньшее значение стрелы провисания вант. Однако с уменьшением провисания покрытия возрастают усилия в вантах и опорном контуре, что приводит к увеличению расхода материалов. В каждом конкретном случае оптимальное

¹ Иногда в литературе такие ванты называют однонаправленными.

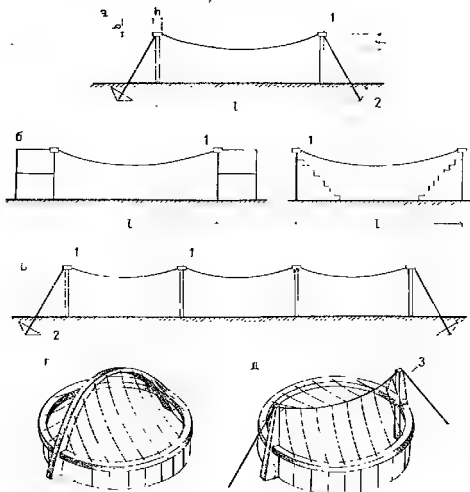


Рис. 11.1. Разновидности висячих оболочек с параллельными вантами

а — с оттяжками; б — с несмещаемыми опорами; в — многопролётная система; г — с промежуточной аркой; д — с промежуточной вантой; 1 — бортовой элемент; 2 — анкерный фундамент; 3 — пилон

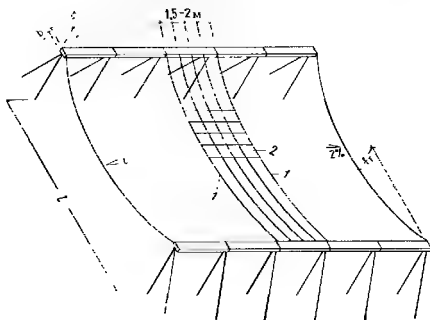
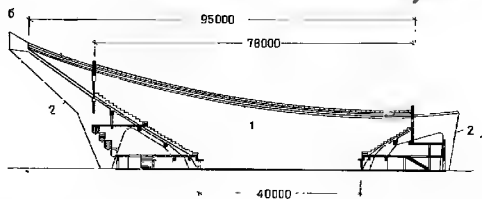
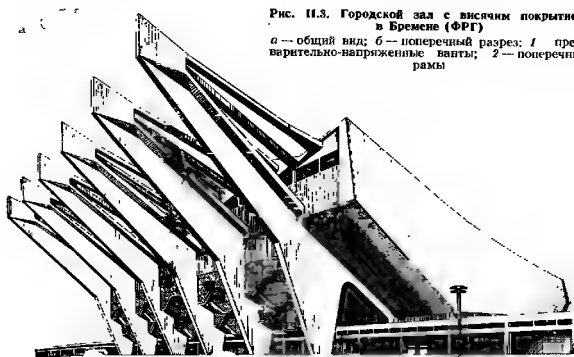


Рис. 11.2. Схема висячей оболочки с параллельными вантами

1 — несущие ванты; 2 — плиты кровли; f_T — стрела провисания в торце здания

Рис. 11.3. Городской зал с висячим покрытием
в Бремене (ФРГ)

а — общий вид; б — поперечный разрез; 1 — пред-
варительно-напряженные ванты; 2 — поперечные
рамы



значение стрелы провисания вант может быть назначено только путем анализа отмеченных факторов.

Вдоль здания шаг вант рекомендуется назначать 1,5—2 м. К торцам здания необходимо предусматривать уклон примерно 2% за счет изменения длины вант (рис. 11.2) или за счет уклона бортовых элементов при постоянной длине вант. Железобетонные бортовые элементы для восприятия распора от вант имеют развинутое сечение в горизонтальной плоскости. Размеры сечения ориентировочно назначают: $h \approx 1/10$ шага колонн, $b \approx 1/15$ шага колонн, где h — ширина сечения; b — высота (см. рис. 11.2). На стадии эскизного проектирования сооружения полагают, что влияния бортового элемента отражается только при назначении марки бетона и количества продольной арматуры.

В висячих оболочках с незамкнутым опорным контуром на устройство анкерных опор затрачивают значительное количество материалов, что увеличивает стоимость сооружения. Более экономичным покрытие получают при применении многопролетной

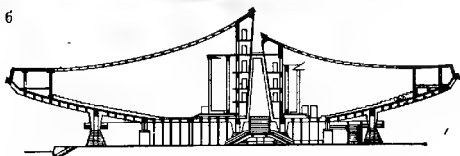
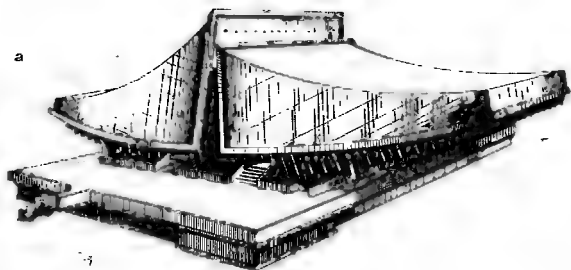


Рис. 11.4. Двухзальный кинотеатр «Россия» в Ереване
а — общий вид; б — продольный разрез

схемы (см. рис. II.1, в). В этом случае с увеличением числа пролетов уменьшается удельное число анкерных опор, и экономичность сооружения возрастает.

Для достижения большей выразительности сооружения бортовые элементы, к которым крепят несущие ванты, в схемах а и б на рис. II.1 часто располагают на разных отметках, например аэровокзал в Вашингтоне, городской зал в Бремене (рис. II.3), двухзальный кинотеатр в Ереване (рис. II.4). Кроме того, для восприятия распора возможна любая комбинация опорных конструкций, из показанных на схемах рис. II.1 и VII.1.

§ 11.2. ПОКРЫТИЯ С РАДИАЛЬНЫМИ ВАНТАМИ

Однослойные радиальные покрытия работают по вантовой схеме только в стадии монтажа. После заливки швов бетоном и предварительного обжатия плит они превращаются в многослойные железобетонные оболочки.

Радиальное расположение вант предопределяет круглую или эллиптическую форму здания в плане. Распор от вант воспринимает замкнутое наружное кольцо, поэтому покрытие в целом является самоуравновешенной системой, и на колонны, поддерживающие опорное кольцо, передаются только вертикальные усилия от массы покрытия.

Конструктивные формы покрытий с радиальным расположением вант приведены на рис. II.5. В схемах а—в и д централь-

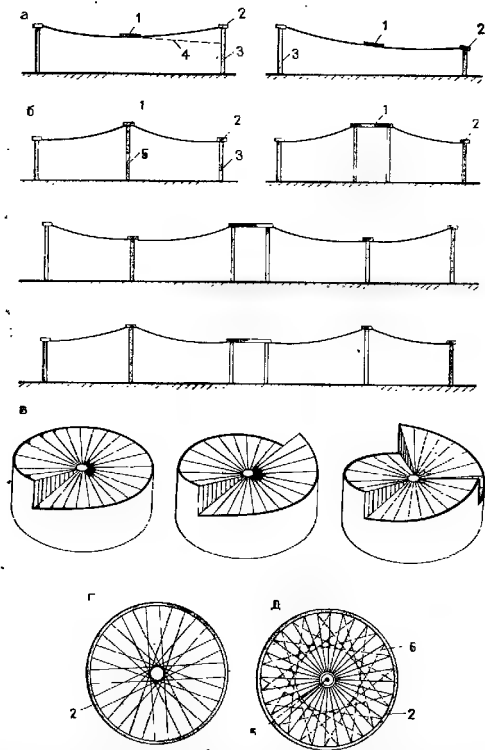


Рис. II.5. Схемы висячих оболочек с радиальными вантами

а — волнчатые покрытия; б — шатровые покрытия; в — спиральные покрытия; г — покрытие без центрального кольца; д — шатровое покрытие со стабилизирующими вантами (предложение НИИСК Госстроя СССР); 1 — центральное кольцо; 2 — наружное опорное кольцо; 3 — колонны; 4 — водоотводящая труба; 5 — центральная стойка; 6 — стабилизирующие (напрягающие) ванты

ное кольцо работает на растяжение, внешнее кольцо (или эллипс) — на сжатие. По этой причине внутреннее кольцо целесообразно проектировать стальным, а наружное — железобетонным. При неравномерно распределенной нагрузке на покрытие железобетонное кольцо испытывает определенные изгибающие моменты, что учитывают при его армировании.

На рис. II.5,а показано радиальное покрытие, в котором отсутствует центральное кольцо. Эта система впервые предложена в ЧОСР и осуществляется попарным расположением вант вдоль хорд, равноудаленных от центра покрытия. Закрепленные обонх концов вант в опорном кольце обеспечивает простоту конструкции и удобство монтажа.

При применении вантовой радиальной сети волнutoго типа возникают трудности с отводом атмосферных вод с покрытия. В данном случае воду можно отводить через трубу, идущую от центра покрытия к наружным стенам, или наклонно устанавливать опорное кольцо (рис. II.5,а). Возможны и более сложные варианты отвода воды с покрытия. Например, в Нью-Йорке в Сквер-Гардене над чашеобразной оболочкой выполнена надстройка для вспомогательных помещений с покатой крышей, с которой вода стекает к периметру здания. В Инглвуде (США) для отвода воды с радиального волнutoго покрытия над зрелищно-спортивным сооружением «Форум» применена система кольцевых ферм, по верхним поясам которых уложена кровля.

Шатровые покрытия можно проектировать однопролетными и многопролетными в виде двух и более концентрических окружностей в плане. При многопролетной схеме промежуточные опорные кольца предусматривают железобетонными, поэтому смежные кольцевые пролеты назначают так, чтобы в опорных кольцах обеспечивалось некоторое усиление сжатия. Когда ванты касаются горизонтальной плоскости в месте примыкания к опорному кольцу, то на центральную стойку передается вся нагрузка от покрытия.

В спиральном покрытии, разработанном ЛенЗНИИЭП, обеспечивается естественный водосток, удобно решается освещение. Данное конструктивное решение придает зданию художественно выразительный внешний вид. Опорное кольцо такого покрытия можно выполнять в виде одной или нескольких восходящих спиралей (рис. II.5,б). Поскольку опорное кольцо получается разомкнутым, для обеспечения его нормальной работы необходимо предусматривать пилоны.

На рис. II.6 показана возможность применения висячих оболочек с радиальными вантами для зданий с планом, отличающимся от круга и эллипса. Конструкция висячей оболочки с вынесенным опорным контуром обеспечивает необходимое изменение формы здания в плане, а опорное кольцо сохраняет наиболее выгодное очертание (в виде веревочного многоугольника системы сил, действующих на кольцо). Шатровое покрытие с угловыми опорами (рис. II.6,б) позволяет перекрывать здания с прямоугольной и квадратной формой плана. В этом покрытии распор от основных вант воспринимает опорное кольцо, на угловые опоры передается только небольшая часть усилий от дополнительных вант. Шатровое покрытие с квадратной формой плана размером 40×40 м применено при строительстве рынков в Красноярске и Череповце.

При конструировании стрелу провисания вант в радиальном покрытии назначают от $\frac{1}{10}$ до $\frac{1}{20}$ перекрываемого диаметра. Раз-

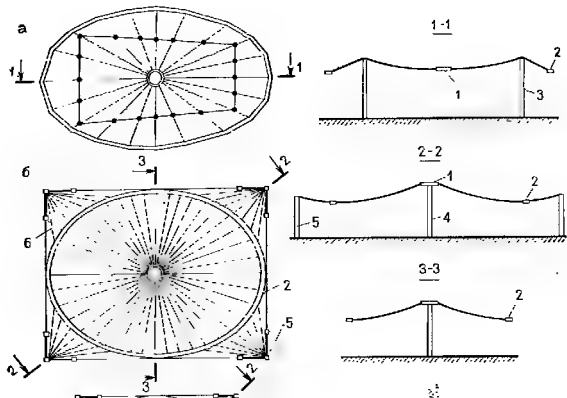


Рис. 11.6. Висячие оболочки с радиальными ваннами для зданий в различной форме в плане

a — покрытие с вынесенным опорным контуром (предложение Н. В. Никитина); *б* — шатровые покрытия с прямоугольным и квадратным планом (предложение ин-та Лекпромстройпроект); *1* — центральное кольцо; *2* — опорный контур; *3* — колонны; *4* — центральная стойка; *5* — угловые опоры; *6* — дополнительные ванты

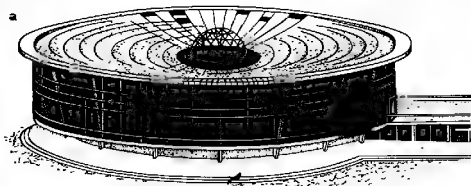


Рис. 11.7. Крытый рынок в Бауманском районе Москвы

a — общий вид в стадии строительства; *б* — конструктивная схема (разрез); *1* — наклонные стойки; *2* — сетчатый металлический купол; *3* — центральное стальное кольцо; *4* — ванты и сборные керамзитобетонные плиты; *5* — сборно-монокричное железобетонное опорное кольцо с сечением 1500×1000 мм; *6* — антресольное перекрытие

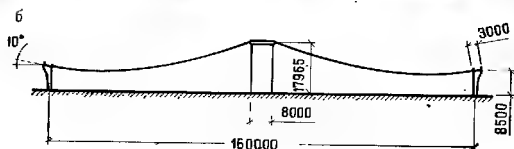
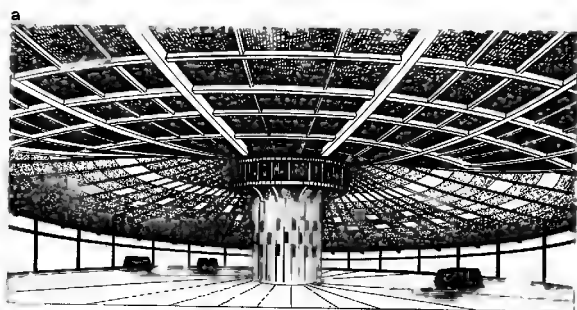


Рис. II.8. Автобусный гараж диаметром 160 м в Киеве
а — интерьер; б — поперечный разрез (схема)

меры кольцевого железобетонного бортового элемента h , b принимают: в плоскости кольца $h = (1/50 - 1/100) d$, по высоте — $b = (0,25 - 0,3) h$, (d — диаметр).

Для предотвращения возможности раскачивания радиального покрытия при действии ветра вантами дают дополнительное натяжение по одному из способов, указанных ранее в § II.1. Передача шатровому покрытию напряжения с помощью стабилизирующих вант показана на рис. II.5 д. В данном случае покрытие будет работать по вантовой схеме и в стадии монтажа, и в стадии эксплуатации.

В качестве примера вогнутого радиального покрытия на рис. II.7 приведен крытый рынок в Бауманском районе Москвы. Покрытие выполнено диаметром 80 м. Сборно-монолитное железобетонное опорное кольцо поддерживают 16 наклонных колонн. По вантам из стальных тросов диаметром 70 мм уложены сборные керамзитобетонные плиты. Напряжение покрытия осуществлено натяжением вант домкратами.

На рис. II.8 показано шатровое покрытие автобусного гаража в Киеве. Диаметр покрытия 160 м, на 82 радиальные ванты из стальных тросов диаметром 65 мм уложены железобетонные ребристые плиты 17 типоразмеров. Швы между плитами заполнены бетоном на расширяющемся цементе, что позволило обеспечить

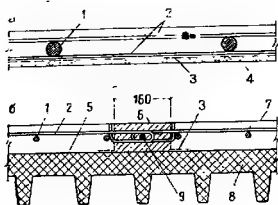


Рис. 11.9. Устройство монолитной оболочки висячего покрытия

а — с опалубкой из стальной тканой сетки; б — с опалубкой из профилированных листов (предложение ин-та Союзкурортпроект); 1 — ванты из арматурной стали; 2 — поперечная арматура; 3 — стальная мелкоячеистая сетка; 4 — штукатурка; 5 — слой рубероида; 6 — шов между полосами бетонирования (бетон); 7 — гидроизоляция; 8 — жесткие минераловатные плиты или приформованный пенопласт; 9 — анкерующий стержень

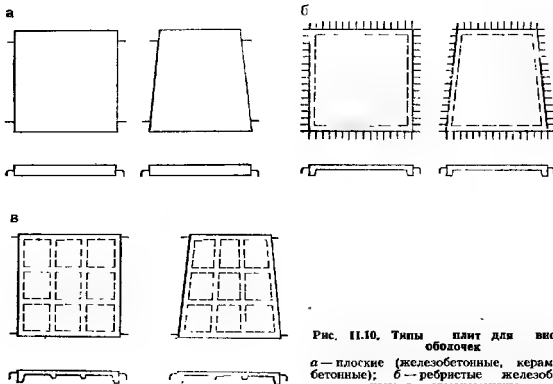


Рис. 11.10. Типы плит для висячих оболочек

а — плоские (железобетонные, керамзитобетонные); б — ребристые железобетонные; в — армоцементные



Рис. 11.11. Варианты раскладки плит в висячих оболочках

а — ортогональная схема; б — раскладка со сбивкой на половину длины; в — радиальная схема

предварительное напряжение оболочки. Центральная башня-ствол диаметром 8 м использована и как вентиляционная шахта. В нижней части покрытия предусмотрен внутренний водосток (обычные воронки, ендова, водосточные трубы).

В висячих оболочках ограждающие конструкции должны быть достаточно тяжелыми для обеспечения стабилизации формы поверхности покрытия. По этой причине кровлю выполняют по традиционной схеме: жесткий утеплитель, стяжка, рулонный ковер.

К вантам можно подвешивать опалубку и по ней бетонировать монолитную оболочку. Монолитным можно укладывать и легкий бетон. Следует отметить, что монолитная ограждающая конструкция обладает большой трещиностойкостью, но по возведению не является индустриальной. Если в качестве опалубки использовать утепленные панели (например, панели из профилированных листов с эффективным утеплителем), то применение бетона на напрягающем цементе позволяет отказываться от устройства кровли (рис. II.9, б).

Наибольшее распространение для висячих оболочек получили сборные плиты из железобетона, армоцемента и керамзитобетона с последующим омоноличиванием швов (рис. II.10). При параллельных вантах сборные плиты имеют квадратную или прямоугольную форму, при радиальных вантах плиты выполняют трапецевидными (рис. II.10 и II.11). По свидетельству различных исследователей [12], ортогональная разрезка плит (рис. II.11, а) неблагоприятно отражается на общей жесткости покрытия. Трещиностойкость швов и жесткость покрытия может быть повышена при раскладке плит со сдвигом на половину длины (рис. II.11, б).

Для опирания на вантах в плитах предусматривают выпуски арматуры или крючья (рис. II.12). Выпуск арматуры по контуру плиты необходим также для армирования швов при их бетонировании и соединения плит между собой (рис. II.12, г). В отдельных случаях крючья выполняются из полосовой стали с прижимными клеммерами для предупреждения сползания плит (рис. II.12, в).

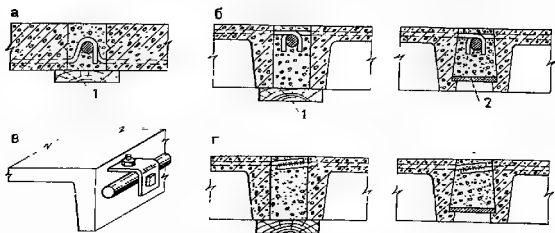


Рис. II.12. Опирание плит на вантах в висячих оболочках

а — при помощи крючьев в плоских плитах; б — с помощью выпусков арматуры каркаса ребер плит; в — с помощью крючьев из полосовой стали с прижимными клеммерами; г — соединение плит между собой в перпендикулярном направлении по отношению к вантам; 1 — деревянная доска, прикрепляемая проволоочной скруткой; 2 — листовая подкладка

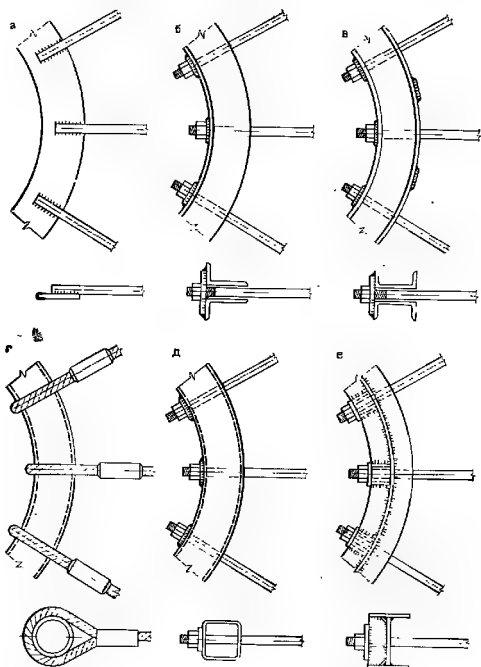


Рис. 11.13. Варианты решения центрального кольца висячих оболочек с радиальными вантами

а — из стального листа; *б* — из прокатных уголкового профиля; *в* — в виде двойных швеллеров; *г* — трубчатое; *д* — из холодногнутых сварных труб квадратного сечения; *е* — сварное в виде двутавра

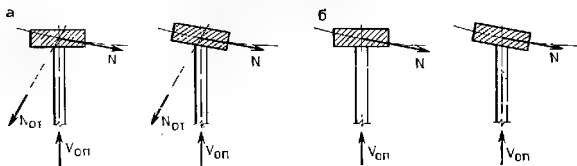


Рис. 11.14. Центрирование усилий в опорном контуре висячей оболочки

а — покрытия с параллельно расположенными вантами; *б* — радиальные покрытия; *N* — усилие в ванте; *V_{оп}* — усилие в опорной стойке; *N_{от}* — усилие в оттяжке

Внутреннее кольцо радиальных покрытий проектируют стальным. Его сечение зависит от действующего растягивающего усилия. Конструкцию кольца принимают по одному из вариантов, показанных на рис. 11.13. Для устранения возможности появления дополнительных усилий в железобетонном опорном контуре силовые потоки нужно центрировать, как показано на рис. 11.14.

Конструктивное решение узлов крепления вант к железобетонному опорному контуру должно соответствовать применяемой технологии предварительного натяжения покрытия. В случае пригрузки покрытия крепление вант упрощается, так как отпадает необходимость изменения длины вант во время монтажа. При

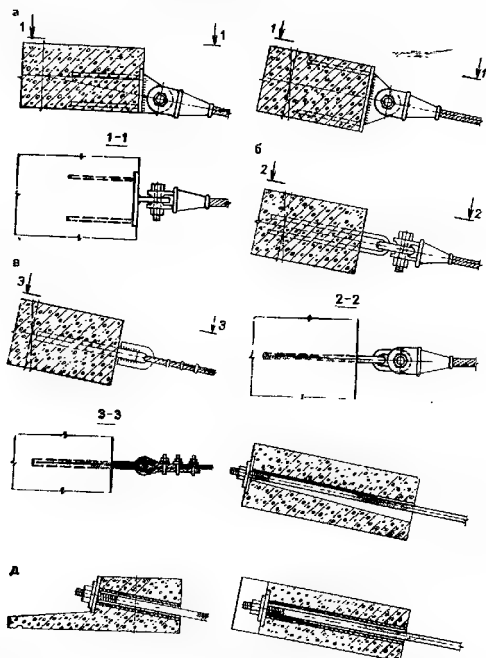


Рис. 11.13. Приемы крепления вант к железобетонному опорному контуру в височной оболочке
 а — приваркой ребер к закладным пластинам; б — с помощью закладной детали в виде петли; в — приваркой к анкеру вилкообразного захвата; г — путем устройства конического отверстия; д — с применением вантовых трубок

напряжении покрытия домкратами концы вант должны позволять регулировку усилий и обеспечивать натяжение вант.

К железобетонному опорному контуру ванты крепят через закладные детали или пропускают сквозь наклонные трубки, как показано на рис. II.15. Диаметр трубок назначают примерно в 1,5 раза большим диаметра концевого закрепления ванты. Вместо трубок можно предусматривать конические отверстия, расширяющиеся к внутренней кромке бортового элемента или опорного кольца. При пропускании вант сквозь опорный контур полости в пределах трубок или отверстий нужно заполнять цементным раствором или битумной мастикой, что обеспечит защиту вант от коррозии.

Металлические бортовые элементы опорного контура по массе легче железобетонных, к ним проще закреплять ванты, однако из соображений экономии их стали применять редко. На рис. III.18, б приведен пример с металлическим бортовым элементом в двухъясном покрытии. При одноясном покрытии решение будет аналогичным.

При параллельном расположении вант распор от покрытия воспринимается специальной опорной конструкцией. В случае применения оттяжек выдерживающее усилие передается в грунт с помощью анкерных фундаментов, варианты решений которых приведены на рис. VII.2.

Глава III. Конструкции двухъясных покрытий

§ III.1. ПОКРЫТИЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВАНТАМИ

При попарном расположении вант в одной вертикальной плоскости можно получить жесткое, малодеформативное покрытие при легкой кровле. Для этого необходимо так сконструировать несущую систему покрытия, чтобы одни ванты оказались вогнутыми, а другие — выпуклыми. На рис. III.1 приведены различные схемы таких двухъясных покрытий. Возможна и асимметричная конфигурация покрытий.

Независимо от взаимного расположения вогнутые ванты всегда являются несущими, выгнутые кверху — стабилизирующими. Вогнутые ванты воспринимают всю нагрузку от массы покрытия и дополнительное усилие от предварительного напряжения несущей системы покрытия. Выгнутые кверху ванты предназначены только для обеспечения предварительного напряжения покрытия. При увеличении нагрузки на покрытие усилие в них падает, поэтому стабилизирующие ванты натягивают с таким расчетом, чтобы при любых сочетаниях нагрузок в них всегда оставалось некоторое усилие растяжения. Попарно соединенные ванты называют в литературе еще фермами из тросов, вантовыми фермами. Фермы с вертикальными элементами называют вантово-стержневыми, причем фермы по схеме рис. III.1, а — двояковыпуклыми.

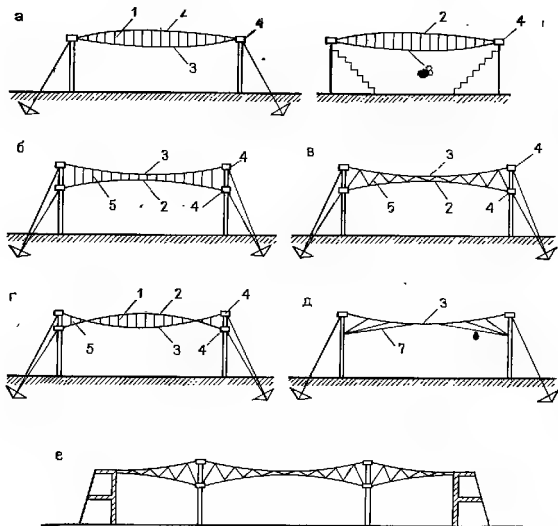


Рис. III.1. Системы двухъярусных покрытий с параллельными вантами

а — с распорками между вантами; б — с гибкими подвесками; в — с растянутыми раскосами; г — со сжатыми и растянутыми стойками; д — с продольными оттяжками; е — многопролетная система; 1 — распорки; 2 — стабилизирующая (напрягающая) ванта; 3 — несущая ванта; 4 — бортовой элемент; 5 — подвески; 6 — раскосы; 7 — продольные оттяжки

по схеме рис. III.1, б — двояковогнутыми, по схеме рис. III.1, г — выпукло-вогнутыми (рыбовидными).

Распор от вант через бортовые элементы передается на оттяжки или рамные конструкции (например, трибуны). Как и в одноярусных покрытиях, бортовые элементы в поперечном разрезе здания могут находиться в одном или разных уровнях, а распор может восприниматься комбинацией опорных конструкций из оттяжек и рам, что позволяет получать разнообразные по выразительности решения зданий с подобными покрытиями. Бортовые элементы в покрытии применяют не всегда: они могут отсутствовать, если шаг вантовых ферм и опорных конструкций совпадает и продольная устойчивость опор обеспечена.

В покрытиях по схеме рис. III.1, а несущие и стабилизирующие ванты соединены распорками. Поскольку распорки предназначены для восприятия сжимающих усилий, на них из условия устойчивости требуется значительная затрата металла. Предварительное напряжение покрытия производят за счет удлинения стоек с по-

мощью специальных муфт (рис. III.15, а) или путем натяжения вант со стороны опор. Возведение покрытия усложняется из-за неустойчивости вантовых ферм, поэтому необходимо предусматривать связи для их раскрепления. Функцию горизонтальных связей может выполнять кровельный настил.

При расположении стабилизирующих вант ниже несущих (рис. III.1, б) вертикальные стойки превращаются в растянутые подвески, поэтому по расходу стали система покрытия становится эффективнее. Если подвески заменить растянутыми раскосами, то получится не только экономичная, но и более устойчивая в своей плоскости система покрытия (рис. III.1, в). Впервые такое конструктивное решение было предложено шведским инженером Явертом, поэтому часто в литературе системы этого типа называются его именем.

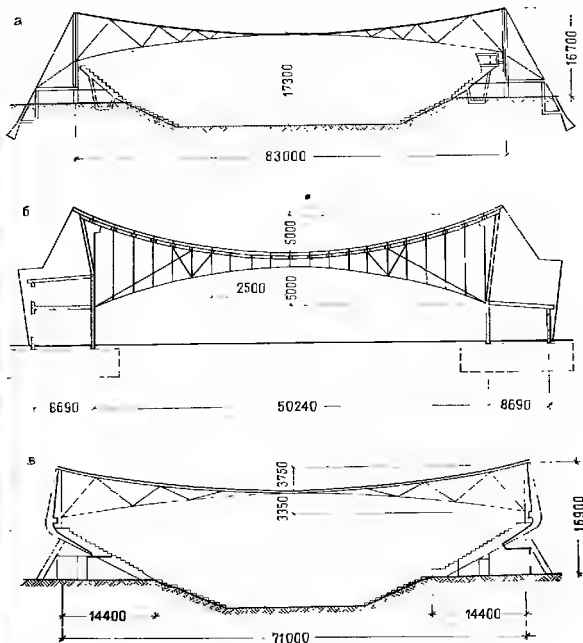


Рис. III.2. Примеры применения двухъярусных покрытий с параллельными вантами

а — хоккейный стадион «Юханнескоф» в Стокгольме (Швеция); б — автобусный парк в Берлине (ГДР); в — гимнастический зал в Сокото (Нигерия)

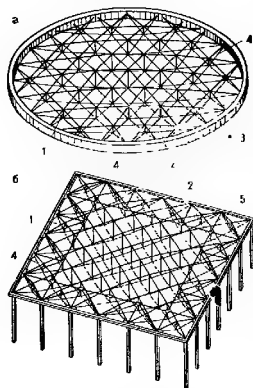


Рис. III.3. Схемы покрытий из перекрещивающихся вантовых ферм

а — в здании с круглым планом; б — то же, с квадратным (предложение ЦНИИСК); 1 — распорки; 2 — стабилизирующие ванты; 3 — опорное кольцо; 4 — несущие ванты; 5 — опорный решетчатый контур

товой схеме. Их обычно применяют для прямоугольных в плане зданий одно- и многопролетных. В качестве примеров применения двухпоясных систем на рис. III.2 приведены конструктивные решения покрытий хоккейного стадиона «Юханнесхоф» и Стокгольме, автобусного парка в Берлине (ГДР) и спортивного зала в Сокото (Нигерия). Размер покрытия стадиона 83×118 м; гаража — $67,6 \times 129$ м; спортзала — 71×55 м. В гараже к вантовым фермам подвешены монорельсы из двутавровых балок № 24.

При расположении параллельных вантовых ферм в двух или трех направлениях образуется несущая система покрытия для здания с круглым или квадратным планом (рис. III.3). В местах пересечения вант располагают распорки, концы вант заанкеривают в опорном контуре. Несущая конструкция позволяет укладывать настил без дополнительных прогонов, отличается равномерностью распределения усилий и обеспечивает покрытие устойчивостью при действии несимметричных нагрузок. Такая система покрытия впервые была применена для зданий с круглой формой плана в Познани и Люблине (ПНР). Широкому распространению перекрестных вантовых ферм препятствует большое число типовых размеров конструктивных элементов в покрытии.

В случае расположения несущих и стабилизирующих вант в разных вертикальных плоскостях, как показано на рис. III.4, создается складчатое покрытие, придающее сооружению своеобраз-

На рис. III.1,2 показан вариант решения покрытия, когда строительная высота вантовых ферм оказывается сравнительно небольшой при заданной кривизне поясов. В этом случае ванты дважды пересекаются в пролете, вследствие чего длина стоек оказывается меньше, а на участках вблизи бортовых элементов устанавливают подвески, работающие на растяжение.

В вогнутых покрытиях (рис. III. 1, б, в, д) усложняется отвод атмосферных вод, этот недостаток устраняется уклоном бортовых элементов опорного контура к торцам здания, как в однопоясном покрытии. Провисание вант во всех системах двухпоясных покрытий рекомендуется назначать в пределах $1/10 - 1/20$ перекрываемого пролета.

Покрытия рассматриваемого типа работают только по ван-

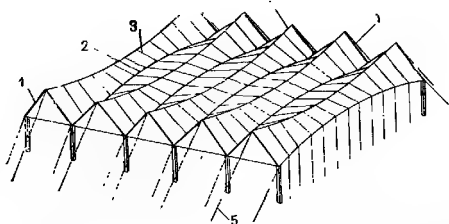


Рис. III.4. Схема складчатого вантового покрытия

1 — опорные подкосы; 2 — стабилизирующие ванты; 3 — растяжки; 4 — несущие ванты; 5 — оттяжки или любые другие опорные конструкции, воспринимающие распор

ный выразительный вид. Впервые подобная конструкция была предложена французским инженером Саржером. Для восприятия распора оттяжки в принципе можно заменять любыми другими опорными конструкциями, показанными на рис. VII.1.

§ III.2. ПОКРЫТИЯ С РАДИАЛЬНЫМИ ВАНТАМИ

Двухпоясные покрытия с радиальным расположением вант получили широкое распространение при строительстве зданий общественного назначения. Статическая схема работы таких покрытий является четкой, возведение сооружения оказывается сравнительно простым. Основные системы двухпоясных радиальных покрытий показаны на рис. III.5 и III.6.

Как правило, во всех покрытиях распор вант воспринимается железобетонным опорным кольцом и стальным центральным барабаном. На колонны передается нагрузка от массы покрытия. Стабилизирующие ванты могут располагаться сверху над несущими, под ними или пересекаться в пролете с несущими, определяя этим своеобразие конструктивного решения покрытия.

Система покрытия с распорками между вантами (рис. III.5, а) впервые была апробирована при сооружении зрелищного зала диаметром 72 м в Утике (США, 1960 г.). Покрытие имеет круглую форму в плане. После монтажа вант центральные кольца были раздвинуты домкратами и закреплены в таком положении, затем между вантами заведены вертикальные распорки, которые придали вантам легкую кривизну и еще более их напрягли. Недостатком этой системы является значительный расход стали на сжатые распорки. При подобном возведении первых покрытий строители встретились с трудностями: высокой точностью определения длины распорок и сложностью достижения кривизны вант. Позднее из удобства предварительного напряжения покрытия было предложено концы стабилизирующих вант притягивать к верхнему кольцу единого центрального барабана.

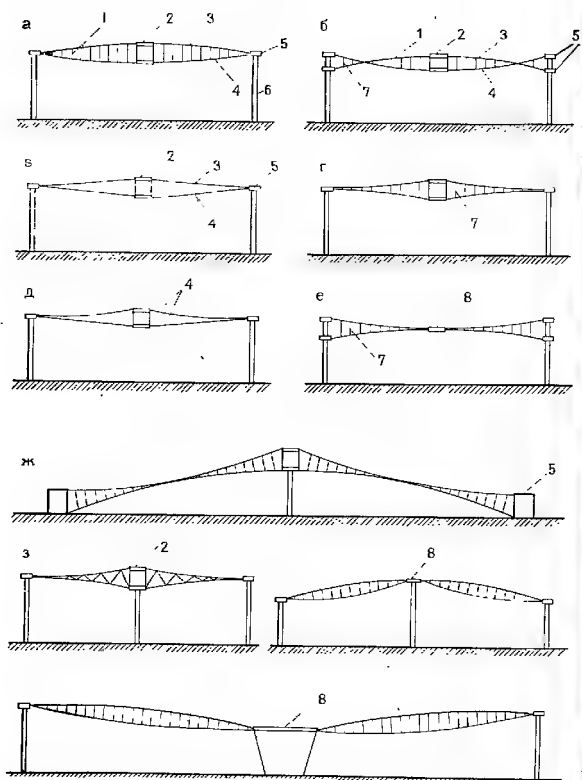


Рис. III.5 Системы двухпропных покрытий с радиальными вантами

а — с распорками; б — с взаимно перекрывающимися вантами; в — типа «велосипедное колесо»; г — шатровое покрытие с растяжками; д — вариант шатрового покрытия; е — волнукое покрытие; ж — с центральной опорой; з — варианты покрытия с центральной опорой; 1 — распорки; 2 — центральный барабан (цилиндрическая ферма); 3 — стабилизирующие ванты; 4 — несущие ванты; 5 — опорное кольцо; 6 — колонны; 7 — растяжки; 8 — центральное кольцо

При пересечении в пролете стабилизирующих и несущих вант (рис. III.5, б) существенно уменьшается строительная высота покрытия. Кроме того, сокращается длина распорок, в зоне у опорного контура появляются подвески. К недостаткам этого кон-

структивного решения относятся необходимость устройства второго опорного кольца и усложнение очертания кровли. От второго опорного кольца можно отказаться, если шаг вант по периметру покрытия назначить равным шагу колонн. В таком случае при одном нижнем кольце верхняя часть колонн будет работать консольно, воспринимая распор от несущих вант. Если отказаться от нижнего кольца, то на колонны будет передаваться распор от стабилизирующих вант, который по значению меньше распора от несущих вант. Впервые система покрытия с одним нижним опорным кольцом была применена при возведении ленинградского Дворца спорта «Юбилейный» диаметром 93 м (1967 г.).

В случае соединения стабилизирующих и несущих вант только в центре с помощью барабана (цилиндрической фермы) получается покрытие, носящее название «велосипедное колесо» (рис. III.5, в). Предварительное напряжение покрытия достигается путем раздвижки барабана по высоте или натяжением стабилизирующих вант. Как показала практика эксплуатации выставочного павильона в Брюсселе, такая система покрытия под действием ветра и снега может легко деформироваться в своей плоскости, что является определенным конструктивным недостатком. В принципе необходимую жесткость покрытия можно получить повышенным предварительным напряжением покрытия, но такой прием пойдет не в пользу экономичности сооружения.

Для обеспечения жесткости покрытия по схеме «велосипедное колесо» (рис. III.5, в) в последнее время вантовую систему модернизируют следующим образом. В Японии широкое распространение получили покрытия, в которых верхние пояса выполнены из жестких элементов в виде балок и даже ферм, хорошо работающих на изгиб в плоскости покрытия [60]. При возведении музея-панорамы диаметром 43,7 м близ Бад-Франкенхаузена (ГДР) верхний пояс покрытия выполнен в виде предварительно напряженной железобетонной конической оболочки, собранной из треугольных панелей заводского изготовления длиной от верхнего кольца центрального барабана до опорного контура.

В шатровом покрытии (рис. III.5, г) все вертикальные подвески работают на растяжение, поэтому расход металла в данном случае получается наименьшим. Покрытие, показанное на рис. III.5, д, нуждается в тяжелой кровле и по приему предварительного напряжения относится к висячей оболочке. В данном случае центральный барабан применяют для устранения вогнутости покрытия.

В вогнутом покрытии (рис. III.5, е) вместо барабана использовано одно центральное кольцо. Так как несущие ванты находятся выше стабилизирующих, все вертикальные элементы оказываются растянутыми, что приводит к экономии стали. К недостаткам этой системы покрытия относят появление второго опорного кольца и сложность удаления воды с кровли. Для удобства отвода воды с покрытия выставочного зала диаметром 80 м в Хернинге (Дания), кровельное ограждение уложено по нижним поясам вантовой конструкции. В этом покрытии несущие ванты открытые, от атмосферных воздействий они защищены смазкой и

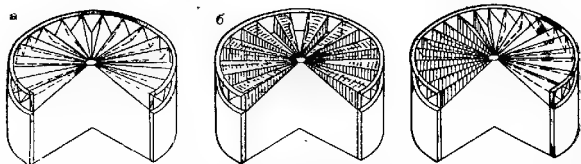


Рис. 11.6. Складчатые радиальные покрытия с вантовыми фермами

а — система Яверта (раскосы условно не показаны); б — варианты складок при вертикальном расположении вантовых ферм

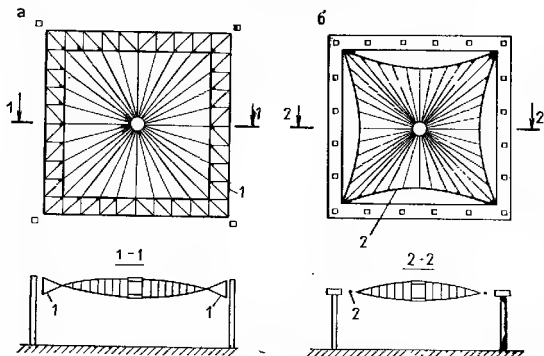


Рис. 11.7. Двухслойные радиальные покрытия на квадратном плане

а — с изгибным опорным контуром; б — с безызгибным опорным контуром; 1 — пространственная металлическая ферма; 2 — трос подбор

оболочкой из поливинилхлорида. Подвески применены из алюминиевого сплава, все соединительные элементы выполнены алюминевыми и из нержавеющей стали.

Система покрытия с опорной стойкой (рис. 11.5, ж) позволяет перекрывать пространство диаметром 160—320 м. Опорный контур представляет собой коробчатое кольцо, в котором могут быть размещены помещения различного назначения. Применение центральной опоры позволяет образовывать различные формы покрытий. Несколько таких примеров показано на рис. 11.5, з.

Если в радиальном покрытии с верхним размещением несущих вант стабилизирующие ванты сместить в плоскости опорного кольца на половину шага, то растянутые раскосы расположатся не в вертикальной плоскости, а в наклонной и покрытие получит складчатую форму (рис. 11.6, а). Складчатые формы покрытий могут быть образованы и при вертикальном расположении вантовых ферм (рис. 11.6, б).

Радиальное расположение вант в двухпоясных покрытиях предопределяет круглую форму здания в плане. В отдельных решениях покрытий встречается овальная форма, например в павильоне штата Нью-Йорк на Международной выставке в США (1964—1965 гг.) и спортивном зале в Берлине (ГДР). Однако при радиальной системе покрытия возможен и квадратный план (рис. III.7). В случае работы опорного контура на изгиб его конструкцию предусматривают в виде пространственной фермы с треугольным поперечным сечением (рис. III.7,а). Для устранения изгиба опорного контура можно применять тросы-подборы, которые передают распор в углы контура (рис. III.7,б).

Независимо от системы радиального покрытия стрелу провисания несущих вант назначают $1/10—1/20$ перекрываемого диаметра, стрелу подъема стабилизирующих вант можно принимать $1/10—1/30$ диаметра покрытия. Размеры колец центрального барабана назначают из условия удобного крепления концов вант, диаметр барабана чаще всего составляет 6—12 м. Из соображений устойчивости наружное опорное кольцо выполняют таким же, как в однопоясных радиальных покрытиях.

Для обеспечения общей пространственной жесткости радиальных вантовых систем следует предусматривать решетчатые кольцевые связи. В меридиональном направлении покрытия эти связи устанавливают с шагом 1000—1200 радиусов инерции поперечного сечения стабилизирующей ванта.

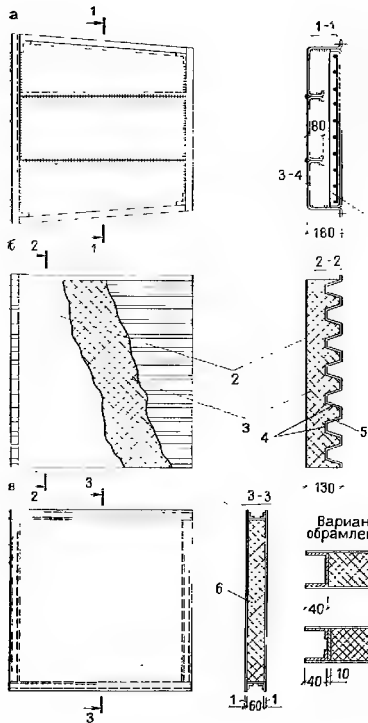
По литературе можно ознакомиться со следующими интересными примерами осуществленных двухпоясных радиальных вантовых покрытий: Дворец спорта «Юбилейный» в Ленинграде, павильон США на Всемирной выставке в Брюсселе, Дворец спорта в Генуе, выставочный павильон в Нью-Йорке, Дворец спорта в Ереване, универсам в Киеве, спортивная арена в Хамптоне (США), выставочный зал в Хернинге (Дания), крытый каток в Брно (ЧССР) и др. [1, 4, 12, 19, 20, 35, 38, 41].

§ III.3. УСТРОЙСТВО КРОВЛИ

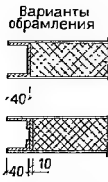
Двухпоясные вантовые системы после их предварительного напряжения становятся жесткой несущей конструкцией, поэтому в качестве ограждающего элемента кровли применяют различные легкие настилы. В практике строительства для устройства кровли используют панели из гнутых стальных профилей, алюминиевых сплавов, стеклопластиков или волнистые листы из этих материалов. В случае применения прозрачного полиэфирного стеклопластика или органического (акрилового) стекла для холодного покрытия в здании обеспечивается естественное освещение. В зарубежной и отечественной практике встречается кровля с деревянным заполнением (из-за простоты изготовления).

Роль утеплителя кровли обычно выполняют легкие материалы типа пенопласта (полистирольные, поливинилхлоридные, фенольные, полиуретановые). Для гидроизоляционного ковра применяют рубероид на битумной мастике, стеклоткань на резиобитум-

Рис. 111.8. Металлические панели для вантовых покрытий



а — сварная из гнутого
стального листа; б — двух-
слойная из стального про-
филированного настила; в —
трехслойная из алюминиевых
листов; 1 — акустическое за-
полнение по сетке или слой
пенопласта; 2 — слой рубе-
роида; 3 — пенопласт ФРП-1
или ПСБ С; 4 — слой клеи
88-Н; 5 — оцинкованный на-
стил Н80 674-1; 6 — пено-
пласт



ной мастике. В кровле с настилом из пластических масс водоне-
проницаемость швов обеспечивают эластичными прокладками и
нащельниками.

Представляется весьма перспективным использование для кро-
вли напыленных пенопластов [11]. Применение напыленных пено-
полиуретанов позволяет отказаться от устройства традиционной
стяжки и гидроизоляции, что существенно сокращает объем стро-
ительно-монтажных работ. Для защиты напыленного пенопласта
от атмосферных воздействий можно наносить тонкий слой из
тех же компонентов полиуретана, только без вспенивающего аген-
та. Широкое применение новой кровли пока сдерживается в СССР
дефицитностью пенопластов пониженной горючести.

Сортамент стальных оцинкованных и алюминиевых профилированных листов для настилов кровли приведен в прил. 6—8. Волнистый полиэфирный стеклопластик изготавливают с типоразмерами волн 200/54, 167/50, 125/35, 90/30 (над чертой — шаг волны; под чертой — высота волны); толщина листов стеклопластика 1,5; 2; 2,5 мм, плотность 1400 кг/м³.

Конструктивные решения утепленных металлических плит разнообразны. На рис. III.8 показано несколько их примеров. Сварные плиты из стального гнутого листа (рис. III.8, а) были применены в покрытии Дворца спорта «Юбилейный» в Ленинграде. Четыре типа гнутых профилей позволили скомпоновать все плиты покрытия. Стальные сетки внизу плиты были предусмотрены для акустического заполнителя. Для покрытия с параллельным расположением вант плиты такого типа следует конструировать квадратной или прямоугольной. Поверх плит укладывают обычную многослойную кровлю.

Конструкция двухслойной плиты с применением стального оцинкованного профилированного настила и пенопласта (рис. III.8, б) разработана в Уральском политехническом институте им. С. М. Кирова. В момент изготовления плиты фенольный или полистирольный пенопласт припеннивают к настилу, одновременно приписывают и один слой рубероида, который защищает пенопласт от возможного повреждения при транспортировании, монтаже и служит основой для наклейки остальных слоев рулонной кровли. Такой вариант плиты удобен для покрытий с параллельными вантами.

Трехслойные панели различного назначения из алюминиевых листов и пенопласта разработаны ЦНИИПромзданий. На рис. III.8, в показан принцип конструктивного решения плиты для покрытия с параллельными вантами. В случае радиальной системы покрытия плиты будут иметь трапециевидную форму в плане.

Настил укладывают либо непосредственно на ванты, либо на прогоны. Ванты, расположенные ниже кровли, удобны для эксплуатации, поскольку доступны для периодического осмотра и окраски. Крепление профилированных листов к вантам и использование их в качестве элементов кровли показано на рис. III.9. При расположении минераловатного утеплителя под настилом (рис. III.9, в) пароизоляцию выполняют из фольги, наклеенной на картон. В этом случае снизу предусматривается сетка. При напылении пенопласта к настилу снизу пароизоляция не требуется.

Металлические плиты опираются на специальные столбики (рис. III.10, а). Швы между плитами заполняют утеплителем, чаще всего минеральной ватой. Стыки плит имеют различные конструктивные решения, зависящие от материала и обрамления плиты (рис. III.10, б—д).

§ III.4. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ КРЕПЛЕНИЯ ВАНТ

Распорки между вантами в двухъярусных покрытиях должны обладать равноустойчивостью в вертикальных плоскостях, поэтому их обычно конструируют из труб. На рис. III.11 показаны ва-

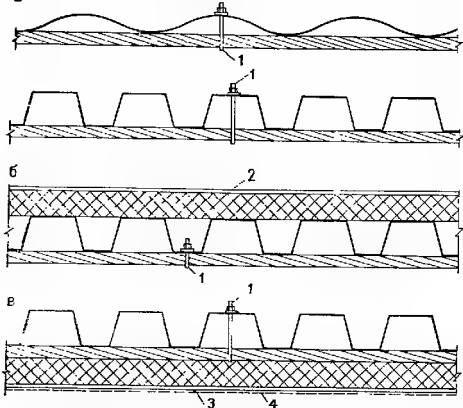


Рис. III.9. Конструкция кровли из профилированных листов в вантовых покрытиях

а — без утеплителя; *б* — с верхним расположением утеплителя; *в* — с размещением утеплителя под настилом; 1 — болт в виде крюка; 2 — гидроизоляционный ковер; 3 — парoisоляция; 4 — поддерживающая сетка

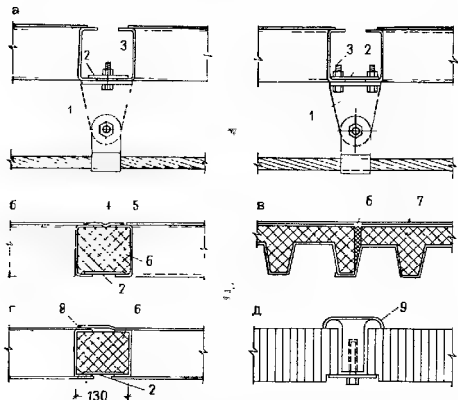


Рис. III.10. Детали стыков плит в вантовом покрытии

а — опирание плит на специальный столик; *б* — сварной стык стальных плит; *в* — стык двухслойных плит конструкции УПИ; *г* — сварной стык алюминиевых плит; *д* — стык с нащельником (для стеклопластиковых плит); 1 — опорный столик; 2 — прокладка; 3 — монтажные болты; 4 — контурная полоса; 5 — сварной шов; 6 — минераловатный утеплитель; 7 — двухслойный рулонный ковер; 8 — аргодуговой сварной шов; 9 — нащельник с упругими прокладками

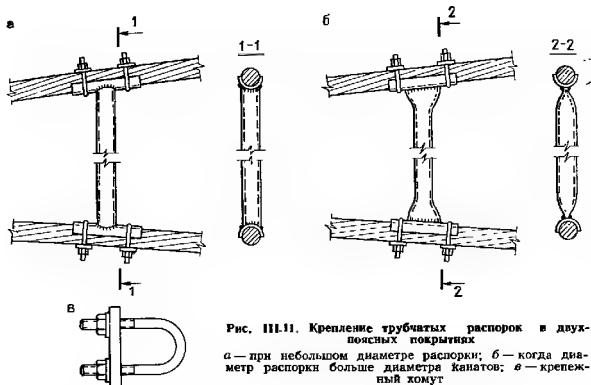


Рис. III.11. Крепление трубчатых распорок в двух-
поясных покрытиях

а — при небольшом диаметре распорки; б — когда диаметр распорки больше диаметра канатов; в — крепежный хомут

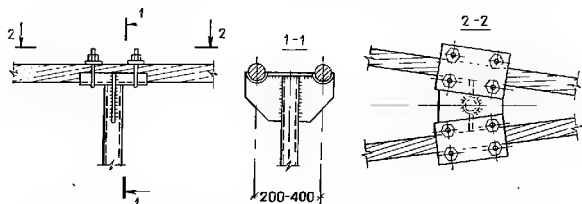


Рис. III.12. Вариант крепления распорки в радиальном двухпоясном покрытии вблизи центрального барабана

рианты крепления распорок к несущим и стабилизирующим вантам. В радиальных покрытиях вблизи центрального барабана ванты располагают довольно часто, поэтому можно применять одну распорку на две ванты (рис. III.12). В покрытии ленинградского Дворца спорта «Юбилейный» было предусмотрено шарнирное крепление распорок к вантам (рис. III.13). Такой вариант целесообразен при большом пролете покрытия. Крепление растяжек к несущим и стабилизирующим вантам с помощью хомутов различной конструкции показано на рис. III.14.

Для предварительного напряжения поясов в покрытиях с параллельным или радиальным расположением вант в распорках и растяжках можно предусматривать вантовые муфты (рис. III.15). Чтобы муфты не раскручивались, устанавливают контргайки. Пересечение натягивающих и стабилизирующих вант в вертикальной плоскости в пролете покрытия фиксируют с помощью хомутов или штампованных накладок (рис. III.16).

Рис. III.13. Шарнирное крепление распорки к вантам в двухпролетном покрытии большого пролета
1 — столик для плит кровли; 2 — распорка

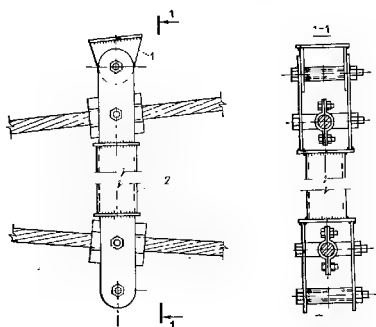
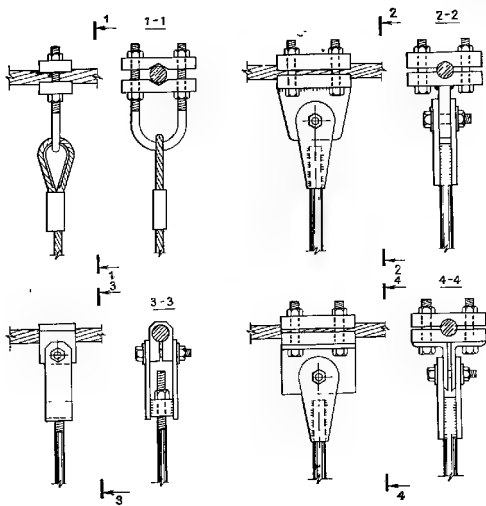


Рис. III.14. Варианты крепления растяжек к поясам вантовых ферм



Крепление раскосов к поясам для систем покрытий с вантовыми фермами Яверта показано на рис. III. 17. Размеры сечений элементов соединения назначают по результатам расчета прочности на растяжение, срез и смятие. Как показали данные экспериментальных исследований, проведенных в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, для увеличения трения между контактными поверхно-

Рис. III.15. Устройство винтовых муфт для на-
пряжения двухпоясных покрытий

a — в распорках; *б* — в растяжках; 1 — контр-
гайка; 2 — отверстие под штырь для вращения
болта

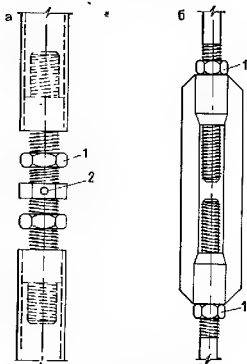
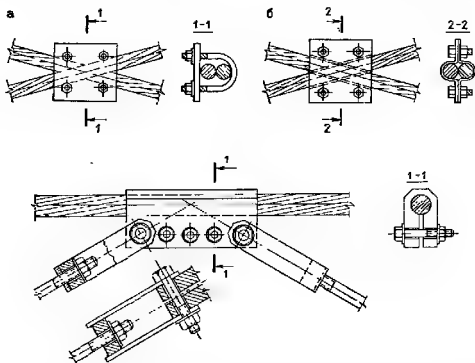


Рис. III.16. Узлы пересечения несущих и ста-
билизирующих вант

a — соединение на хомутах; *б* — соединение
двумя штампованными накладками

Рис. III.17. Крепление раскосов в вантовой
ферме



стями сжима и каната необходимо предусматривать специаль-
ные меры. Применение наждачной бумаги с фрикционным порош-
ком с обеих сторон резко увеличивает сцепление сжима с канатом.
Еще лучший эффект достигается при обработке контактных по-
верхностей клеем на эпоксидной основе с добавлением кварце-
вого или корундового песка.

Конструктивное решение узлов крепления вант в двухпоясных
покрытиях к опорному контуру аналогично решению узлов вися-
чих оболочек. В дополнение к рис. II. 15 ниже приведен вариант
узла в случае примыкания несущих и стабилизирующих вант к

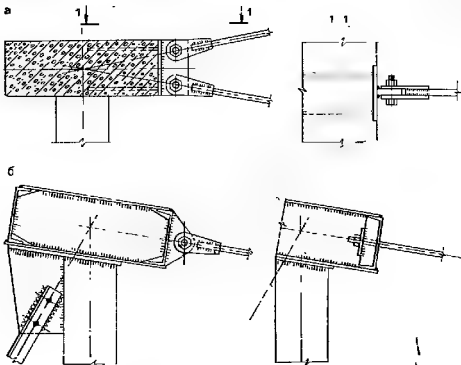


Рис. III.18. Варианты крепления вант к бортовым элементам в двухъярусных покрытиях
 а — к железобетонному в радиальном покрытии; б — к металлическому в покрытии с параллельными вантами

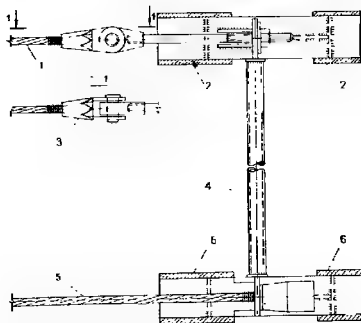


Рис. III.18. Пример устройства центрального барабана в двухъярусном вантовом покрытии

1 — натягивающая ванта; 2 — верхнее кольцо; 3 — заливная втулка; 4 — трубчатые стойки; 5 — несущая ванта; 6 — нижнее кольцо

одному железобетонному бортовому элементу (рис. III. 18, а). Пример крепления ванты к металлическому бортовому элементу показан на рис. III.18, б. Сечение элемента определяют из расчета на прочность. Оно может быть скомпоновано из различных прокатных профилей. Для защиты от коррозии металлические бортовые элементы обычно омоноличивают бетоном.

В двухъярусных покрытиях центральный барабан представляет собой два кольца, между которыми равномерно устанавливают трубчатые стойки. Варианты сечений колец аналогичны решениям для висячих оболочек с радиальными вантами (см. рис. II. 13). Пример устройства центрального барабана приведен на рис. III.19.

§ IV.1. ФОРМЫ ПОКРЫТИЙ И СЕТЕЙ

Покрытия с вантовыми сетями имеют весьма разнообразные архитектурные формы и позволяют постоянно находить оригинальные, художественно выразительные решения сооружений различного функционального назначения. Однако следует иметь в виду, что формы покрытий не образуются совершенно произвольно, они зависят от очертания плана, геометрии поверхности и законов статики. В большинстве случаев архитектурный замысел влияет на выбор конструкции опорного контура, которая совместно с вантовой сетью обуславливает формообразование поверхности покрытия.

Вантовые сети, как правило, образуются ортогональным пересечением двух семейств нитей — провисающих и вспарушенных. Покрытие при этом получает седлообразную форму. В отдельных случаях применяют сети более сложной перекрестной системы на основе треугольных или шестиугольных ячеек.

После предварительного натяжения сети двойкой кривизны превращаются в жесткую конструктивную систему, в которой усилия напряжения со стабилизирующих вант передаются на несущие ванты только в узлах пересечения. Под действием внешней нагрузки покрытие прогибается вниз, несущие ванты удлиняются, усилие в них нарастает, в это же время усилия натяжения стабилизирующих вант ослабевают и если они полностью погасаются, то покрытие потеряет жесткость. По этой причине усилия начального натяжения стабилизирующих вант назначают таким образом, чтобы при полной нагрузке на покрытие они не смогли снизиться до нуля.

Гиперболический параболоид является самой простой формой поверхности покрытия с вантовой сетью (рис. IV. 1). Однако в опорном контуре при таком конструктивном решении возникают значительные изгибающие моменты, что приводит к перерасходу материалов и удорожанию сооружения. Чтобы напряжения от изгиба свести к минимуму, бортовые элементы, как правило, выполняют криволинейными. Криволинейность, кроме того, является ос-

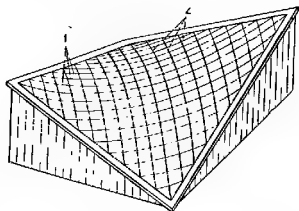


Рис. IV.1. Вантовая сеть в покрытии с поверхностью гиперболического параболоида

1 — несущие ванты; 2 — стабилизирующие ванты

Рис. IV.2. Схемы вантовых покрытий с изогнутым опорным кольцом

1 — несущие ванты; 2 — стабилизирующие ванты

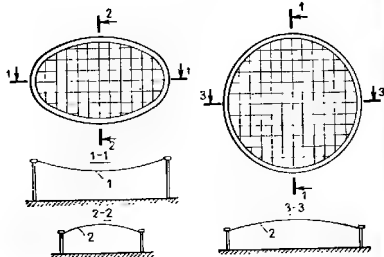


Рис. IV.3. Цирк с седловидным вантовым покрытием (типовой проект Гипротетра)

а — общий вид здания цирка; б — план покрытия; в — разрез; 1, 2 — железобетонные кольца с поперечным сечением $1,5 \times 0,8$ м; 3 — монолитная плита (соединяя кольца, образует серповидный опорный контур с двутавровым поперечным сечением)

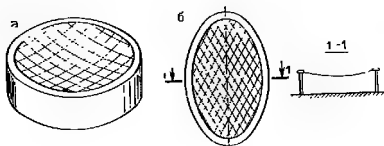
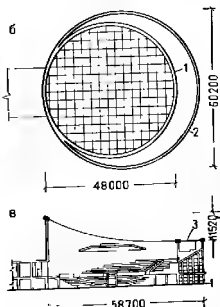


Рис. IV.4. Покрытия с перекрестными несущими вантами (провисающие вантовые сети)

а — ортогональная сеть на круглом плане; б — косуюгуюльную сеть на эллиптическом плане

новой своеобразия архитектурных форм покрытий с вантовыми сетями, в чем можно убедиться на примерах возведенных сооружений.

Вантовые системы с замкнутым опорным контуром могут иметь кольцо, круглое или эллиптическое, изогнутое в пространстве относительно одной из горизонтальных осей (рис. IV. 2). Опорами такого кольца служат стены или колонны, которые располагают по его периметру. Такие конструктивные системы применены в

покрытиях зрелищного зала в Карлсруэ (ФРГ), выставочного здания с размерами по осям $122 \times 97,5$ м в Оклахома-Сити (США), ярмарочного павильона диаметром 116 м в штате Аризона (США), зала театра на 5000 мест с размерами по осям $80 \times 73,5$ м в Лагосе (Нигерия), Дворца спорта диаметром 140 м в Милане (Италия), зала многоцелевого назначения диаметром 108 м в Гетеборге (Швеция), спортивной арены диаметром 122 м в Вашингтоне (США), спортивного зала диаметром 62,4 м в Эври (Франция).

В нашей стране построено семь цирков с седловидным покрытием по типовому проекту, разработанному в Гипротеатре (рис. IV. 3). Железобетонный опорный контур покрытия в них установлен наклонно, что вызвано функциональными особенностями планировки цирка (под повышенной частью оболочки расположен экран для демонстрации кинофильмов). Вантовая сеть имеет квадратную ячейку $2,4 \times 2,4$ м и выполнена из тросов диаметром 52,5 м. После предварительного натяжения вантовой сети смонтировано кровельное ограждение из железобетонных плит, швы между которыми замоноличены.

По конструктивной схеме покрытие цирка можно считать вантовым, поскольку применена предварительно-натянутая сеть из несущих и стабилизирующих тросов, поверхность покрытия имеет отрицательную гауссову кривизну, опорный контур изогнут. Замоноличивание швов между плитами совместно с вантами объясняется стремлением проектировщиков дополнительно увеличить жесткость покрытия. Но в принципе можно было ограничиться применением легкой кровли. Данное покрытие нельзя считать висячей оболочкой в полном смысле этой конструктивной схемы, так как стабилизирующие ванты в работе железобетонной оболочки под нагрузкой не нужны.

Если опорное кольцо предусмотреть плоским, то вантовая сеть будет иметь поверхность эллиптического параболоида (рис. IV. 4). При эллиптическом плане и косоугольной вантовой сети в опорном контуре при равномерно распределенной нагрузке обеспечивается безызгибность; во всех вантах усилия выравниваются. Ванты в обоих направлениях при провисающей сети являются несущими и гибкими, поэтому такая система покрытия требует тяжелой кровли с последующим превращением ее в висячую железобетонную оболочку.

При назначении опорного контура вантовой системы в виде двух взаимно пересекающихся арок возможны различные решения покрытия, поскольку в довольно широких пределах можно варьировать размерами и очертанием этих арок, углами наклона их к горизонту, формой здания в плане (рис. IV. 5). Очертание арок обычно назначают параболическим. Основным материалом для них служит железобетон. Такие покрытия с различными модификациями нашли широкое применение в строительной практике. Равновесие покрытий обеспечивают колонны, поддерживающие арки, стойки витража или оттяжки в плоскости наружных стен. Формы покрытий с двумя пересекающимися арками отно-

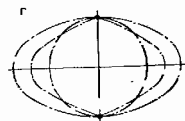
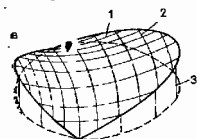
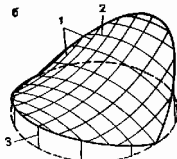
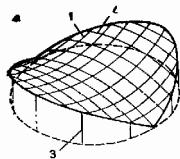


Рис. IV.5. Вантовые покрытия с опорным контуром на двух взаимно пересекающихся арках

а — симметричные арки; б — разные углы наклона арок к горизонту; в — различные по размерам и очертанию арки; 2 — возможные формы плана здания; 1 — несущие ванта; 2 — стабилизирующие ванта; 3 — колонны или оттяжки

сятся к особому виду седловидных поверхностей, которые соответственно отличаются от гипаров.

Интересным примером решения покрытия с использованием пересекающихся арок служит киноконцертный зал «Украина» в Харькове (рис. IV. 6). Зал на 2000 мест перекрыт системой из двух монолитных железобетонных арок параболического очертания и вантавой сети, по которой уложены армоцементные плиты. В качестве несущих вант использованы пучки высокопрочной проволоки, стабилизирующие ванта выполнены из канатов, ячейка сетки принята размером 1×1 м. Стабилизирующие ванта напрягали домкратами дважды: до укладки плит и после нее.

При ортогональной вантавой сети (см. рис. IV. 5) арки в опорном контуре помимо сжатия испытывают изгиб и кручение, поэтому их сечение назначают более мощным по сравнению с опорным кольцом в седловидных покрытиях. Если ванта расположить по прямолинейным образующим гиперболического параболоида, то получится косоугольная вантавая сеть. В этом случае все ванта одновременно становятся и несущими, и стабилизирующими, а в опорных арках действуют только сжимающие усилия, и на фундаменты распор не передается. Такая конструкция покрытия запатентована во Франции и впервые применена в зале многоцелевого назначения с круглой формой в плане диаметром 75 м в Кабре [4].

Опыт зарубежного строительства седловидных покрытий с двумя арками достаточно широко освещен в литературе: зал для празднеств в Киапизаке близ Кельна (ФРГ), здание конгрессов в Западном Берлине, спортивный зал в Братиславе (ЧССР), актовый зал политехнического института в Братиславе, зал съездов и зимний стадион в Ростке (ГДР), музей вин в Будапеште (ВНР), стадион в Гаване (Куба), плавательный бассейн в Милане (Италия), зимний стадион в Прешове (ЧССР), летний кинотеатр в Кошалине (ПНР) и т. д. [1, 4, 12, 25, 31, 35, 38, 41, 45, 46].

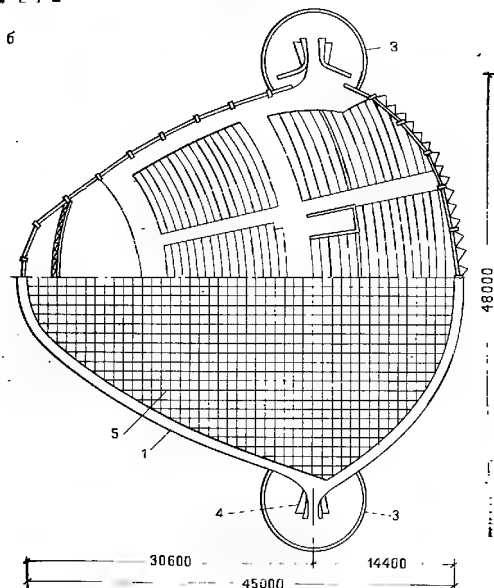
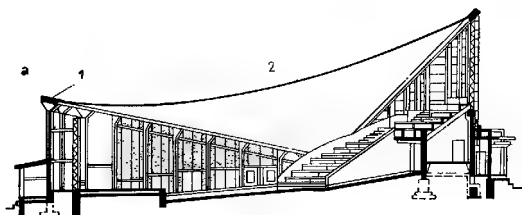


Рис. IV.6. Киноконцертный зал «Украина» с вантовым покрытием (Харьков, 1962 г.)
 а — разрез; б — план; 1 — опорный контур из железобетонных арок с поперечным сечением $2 \times 1,5$ м; 2 — кровля из армоцементных плит, четырех слоев древесноволокнистых плит и четырех слоев рубероида; 3 — водосборные пейзажные бассейны; 4 — монолитные контрфорсы с лотком для атмосферных вод; 5 — вантовая сеть с ячейкой 1×1 м



Рис. IV.8. Покрытие с двумя опрокинутыми арками

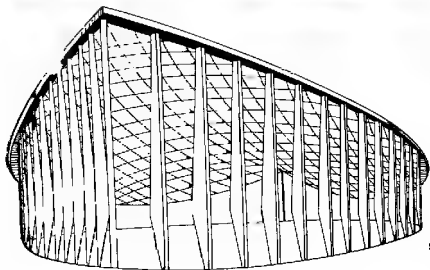
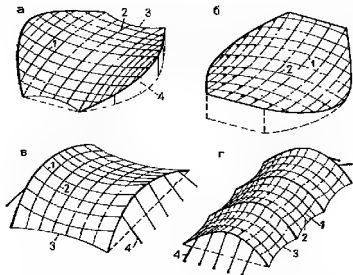


Рис. IV.9. Покрытия с раздвинутыми опорными арками



а — наклонные арки с пятами вниз; б — наклонные арки с пятами вверх; в — вертикальные арки; г — многосредственная система с вертикальными арками; 1 — несущие ванты; 2 — стабилизирующие ванты; 3 — трос-подбор, жесткий сопрягающий элемент (изогнутая балка) или ряд анкеров фундамента; 4 — оттяжки

На рис. IV. 7 показан характерный образ покрытия с двумя наклонными пересекающимися арками. Две наклонные арки в опорном контуре покрытия могут иметь пята выше своих коньков, т. е. быть опрокинутыми (рис. IV. 8). В этом случае распор от арок на фундаменты не передается, вся нагрузка от покрытия воспринимается вертикальными колоннами. Две арки в вантовом покрытии могут и не пересекаться, образуя как бы разомкнутый опорный контур. В этом случае арки устанавливают или наклонно, или вертикально (рис. IV. 9). Для закрепления стабилизирую-

щих вант между пятами арок предусматривают тросы-подборы, жесткие сопрягающие элементы или анкерные фундаменты. При вертикальном положении арок требуются наружные оттяжки для восприятия распора от несущих вант (рис. IV.9, в, г).

Гибкий контур с тросами-подборами целесообразен для легких сооружений. При капитальном строительстве его часто заменяют жесткой конструкцией. Так, например, в покрытии спортивного зала в префектуре Кагава (Япония) пяты опрокинутых арок соединены мощными железобетонными распорками, в покрытии зимнего стадиона в Тампере (Финляндия) стабилизирующие ванты примыкают к изогнутым железобетонным балкам над торцовыми стенами.

Вертикальные арки с оттяжками (рис. IV. 9, в) использованы в покрытиях выставочного зала размером 60×102 м в Сан-Паулу (Бразилия), зимнего стадиона с размерами в плане 63×103 м в Тампере (Финляндия), катка размером $35,5 \times 65$ м в Японии. Вертикальная установка арок позволяет перекрывать несколько пролетов (рис. IV. 9, г), в частности подобное конструктивное решение применено для укрытия спортивных площадок в пос. Леселдзе (ГССР).

Оригинальным примером сооружения с использованием двух разомкнутых арок является решение японским архитектором К. Танге спортивного зала в префектуре Кагава (рис. IV.10). Зал рассчитан на 1300 зрителей и имеет следующее конструктивное решение. Две железобетонные арки коробчатого сечения в опрокинутом положении опираются на четыре пилоны, сверху арки замыкаются двумя торцовыми балками. Опорный контур воспринимает нагрузки от покрытия и от большей части балочного перекрытия трибун. Несущие ванты выполнены из шести семипроволочных прядей, стабилизирующие ванты — из стержневой арматурной стали. На вантовую сеть уложены сборные железобетонные плиты толщиной 5 см, стыки которых забетонированы совместно с вантами. Ванты имеют специальные оболочки, что позволило в процессе возведения регулировать натяжение вант с одного их конца. Следует отметить, что превращение покрытия в жесткую железобетонную оболочку продиктовано необходимостью надежного сопротивления сооружения сейсмическим воздействиям.

Для опорного контура покрытий можно использовать не две, а больше арок. Принцип образования вантовых сетей покрытий при любом числе опорных арок, согласно предложениям Киев-ЗНИИЭП, отражен на рис. IV.11. Возможна конструктивная схема покрытия с тремя взаимно пересекающимися арками, как показано на рис. IV.12. Среднюю арку устанавливают вертикально, боковые арки — горизонтально или наклонно. Подобная система впервые апробирована архитектором Саариненом в покрытии хоккейного стадиона Йэльского университета в Нью-Хейвене (США).

Стадион (рис. IV.13) построен в 1958 г. Его размеры по осям эллипса $69,5 \times 55,8$ м. Горизонтальные железобетонные арки одновременно служат конструкцией трибун. По продольной оси стадиона вертикально расположена железобетонная арка параболическо-

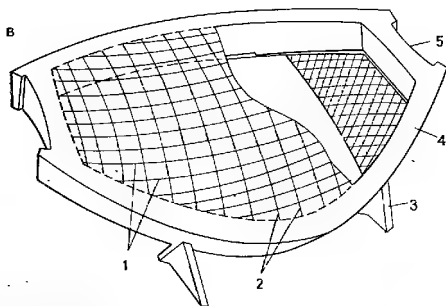
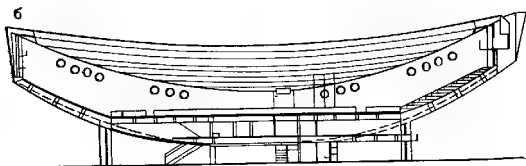
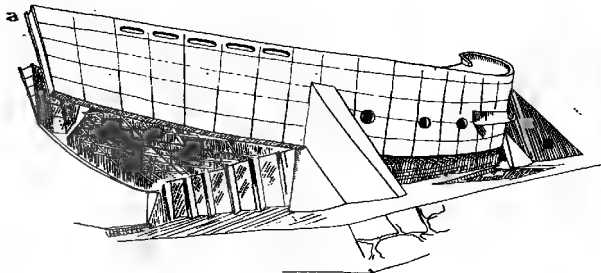


Рис. IV.10. Спортивный зал в префектуре Кагава (Япония, 1964 г.)

a — общий вид; *б* — продольный разрез; *в* — конструктивная схема; 1 — несущие ванты; 2 — стабилизирующие ванты; 3 — опоры; 4 — бортовой элемент; 5 — торцовая балка

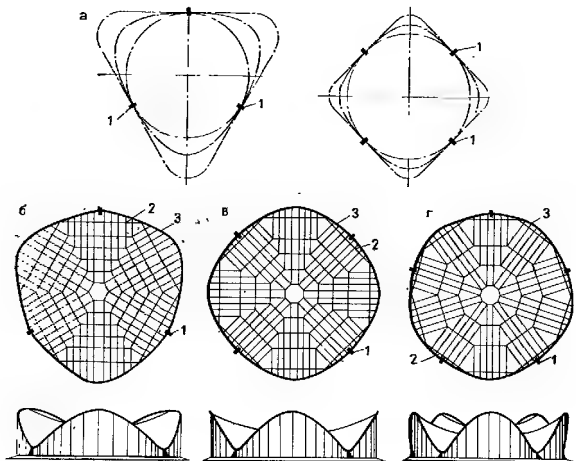


Рис. IV.11. Вантовые покрытия с опорным контуром из нескольких арок
 а — возможные формы плана при трех и четырех арочных элементах; б, в, г — принцип использования трех, четырех, пяти арочных элементов (предложение КиевЗНИИЭП);
 1 — фундаменты арок; 2 — вантовая сеть; 3 — арки опорного контура

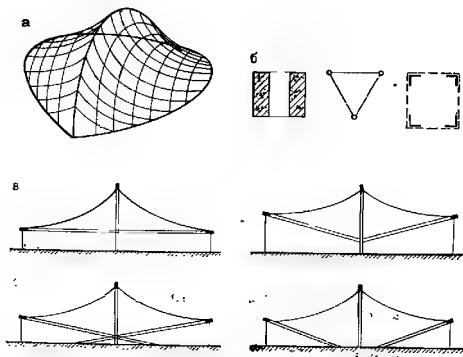


Рис. IV.12. Покрытие с опорным контуром из трех арок
 а — схема покрытия; б — возможные сечения вертикальной арки для устройства верхнего света; в — варианты положения боковых арок в поперечном разрезе сооружения

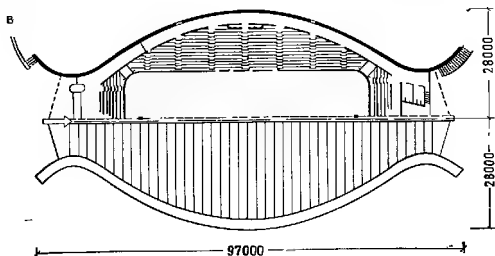
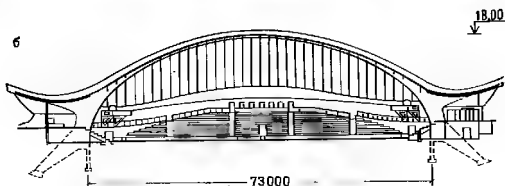


Рис. IV.13. Общий вид хоккейного стадиона Йельского университета (г. Нью-Хейвен, США, 1958 г.)
а — общий вид; б — продольный разрез; в — план

го очертания. Ее концы выведены наружу в виде консолей по 12 м. Эти консоли обеспечили эффектное восприятие арки, как бы парящей в воздухе. По предварительно-напряженной вантовой сети уложена деревянная кровля, покрытая толем.

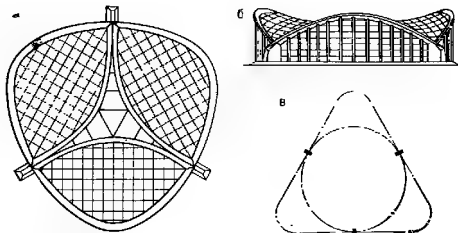


Рис. IV.14. Покрытие с тремя парами взаимно пересекающихся арок
а — план; б — фасад; в — возможные формы плана

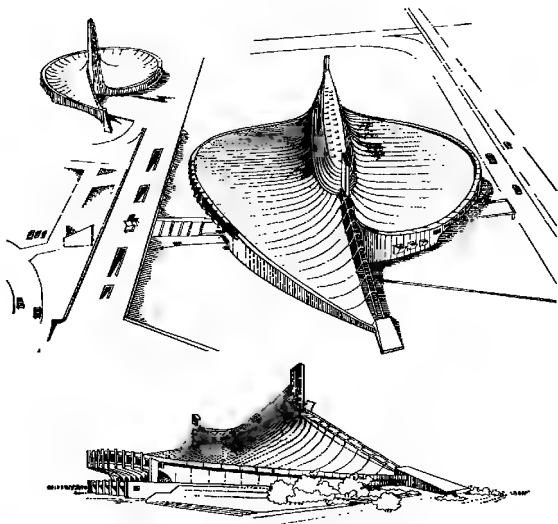


Рис. IV.15. Олимпийский плавательный бассейн в Токио (вид с самолета и общий вид бассейна); Япония, 1964 г.

На рис. IV.14 показана система покрытия с тремя наружными и тремя внутренними арками. Наружные арки могут быть пологими и крутыми, можно задавать различные углы наклона к горизонту. Центральные арки соединены между собой жесткими распорками.

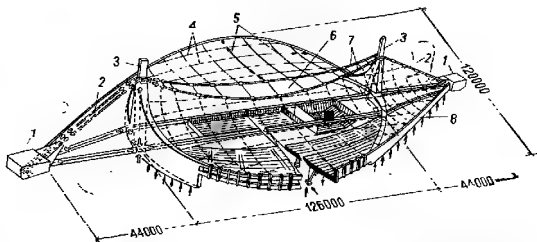


Рис. IV.16. Конструктивная схема покрытия Олимпийского плавательного бассейна в Токио

1 — анкерные фундаменты; 2 — оттяжки; 3 — пилоны; 4 — стабилизирующие ванты; 5 — несущие ванты; 6 — световой фонарь; 7 — главные ванты; 8 — железобетонный опорный контур

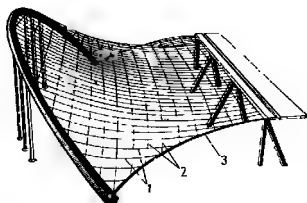


Рис. IV.17. Схема покрытия с одной опорной аркой

1 — несущие ванты; 2 — стабилизирующие ванты; 3 — трос-подбор

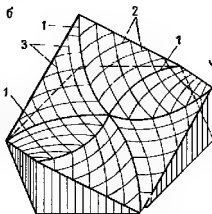
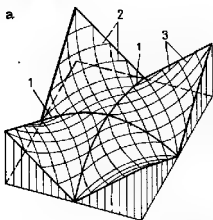


Рис. IV.18. Варианты вантовых покрытий с прямолинейным опорным контуром
а — на квадратном плане; б — на шестиугольном плане; 1 — тросы жесткости; 2 — стабилизирующие ванты; 3 — несущие ванты

Арки опорного контура можно не только размыкать, как показано на рис. IV.9 (в принципе возможна любая раадвижка опор арок в нескольких направлениях). В Олимпийском плавательном бассейне в Токио опоры арочных элементов находятся на разных отметках и смещены вдоль большей оси (рис. IV.15, IV.16). Одним концом железобетонные арки опираются на фундаменты, другим—

на пилоны. К пилонам подвешены две главные ванты, распор от них через оттяжки передается на специальные фундаменты, соединенные между собой распорками. Несущие ванты выполнены из стальных двутавров, стабилизирующие — из тросов. Кровлей служат стальные листы, уложенные по прогонам и утепленные снизу минеральной ватой.

Пример кинотеатра в Праге показывает, что в опорном контуре покрытия с ортогональной вантовой сетью можно использовать только одну арку (рис. IV.17). В этом случае в опорном контуре появляются тросы-подборы.

При прямолинейном опорном контуре возможно образование различных вариантов поверхностей с вантовыми сетями. На рис. IV.18 приведены примеры формообразования покрытий на квадратном и шестиугольном планах. Расположенные по осям симметрии покрытия дополнительные ванты — тросы жесткости — улучшают поверхность вантового покрытия, воспринимают вертикальные и горизонтальные составляющие усилий от примыкающих вант. Такие покрытия разработаны КиевЗНИИЭП и впервые осуществлены в Киеве (крытый рынок на 486 торговых мест с квадратным планом 42×42 м, ресторан на 200 мест с шестиугольным планом при размере боковой грани 12 м).

Для легких временных сооружений можно применять покрытия с гибким опорным контуром. Форма покрытия определяется конструктивным расположением тросов-подборов по периметру ортогональной вантовой сети (рис. IV.19). Покрытия Олимпийского стадиона и плавательного бассейна в Мюнхене (ФРГ) ярко и убедительно демонстрируют возможности систем с опорным контуром из тросов-подборов.

Исследования возможностей сетей с шестиугольной ячейкой привели к созданию различных схем вантовых покрытий (рис. IV.20). Форма и конструктивное решение покрытия определяются приемом предварительного напряжения сети. Однослойная сеть предварительно напрягается притягиванием или оттягиванием центральной опорой (рис. IV.20, б, в), двухслойная — раздвижкой центрального барабана или установкой распорок в каждом узле сети (рис. IV.20, г, д).

Покрытия с шестиугольной структурой вантовой сети имеют несколько преимуществ: постоянный распор во всех элементах сети, один типоразмер кровельных плит, единая конструкция узлов пересечения вант. Недостатком сети является необходимость применения коротких элементов, что затрудняет использование вант из стальных канатов. Покрытия диаметром 50,8 м по схеме рис. IV.20, б осуществлены над рынком в Черкассах и бюветом минеральных вод курорта «Трускавец».

При разработке конструктивной схемы покрытия с вантовой сетью кривизна нитей в большинстве случаев определяется компоновкой сооружения. В возведенных системах покрытий стрелы провисания и подъема вант по главным осям поверхности находятся в пределах $1/10$ — $1/40$ пролета, чаще они близки к $1/20$ пролета. Увеличение кривизмы вант приводит к уменьшению усилий в них, но завышается строительный объем здания. По данным Рюле

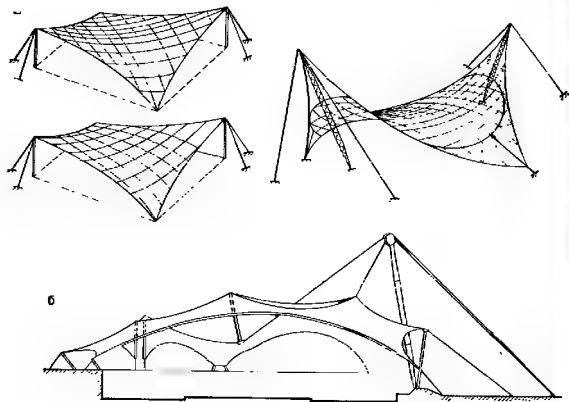


Рис. IV.19. Схемы вантовых покрытий с гибким опорным контуром
 а — варианты покрытий; б — Олимпийский плавательный бассейн в Мюнхене (ФРГ, 1972 г.

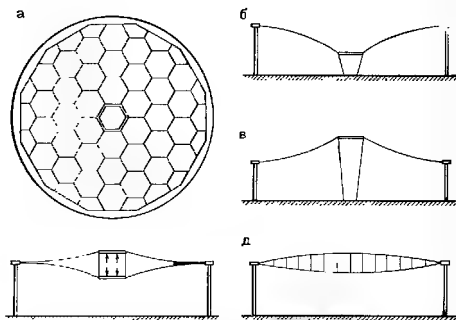


Рис. IV.20. Схемы вантовых покрытий с шестиугольной структурой сети
 а — план; б — однопоясное покрытие с внутренним водостоком; в — то же, с наружным
 г — двухпоясное покрытие отрицательной кривизны с центральным барабаном; д — двух-
 поясное покрытие положительной кривизны с распорками

[41] оптимальное значение стрелы провисания несущих вант составляет примерно $1/25$ пролета, стрелы подъема стабилизирующих вант — $1/12—1/15$ пролета.

Вантовые сети приобретают значительную жесткость после предварительного напряжения. Кровлю по ним выполняют легкой конструкции как в двухпоясных системах покрытий. Устройство легкой кровли рассмотрено в гл. III.

§ IV.2. ОСНОВНЫЕ НЕСУЩИЕ УЗЛЫ И МЕТОДЫ НАТЯЖЕНИЯ СЕТЕЙ

Конструкция узлов пересечения несущих и стабилизирующих вант должна обеспечивать надежную фиксацию положения нитей в сети при действии нагрузки и допускать взаимное проскальзывание во время сборки сети и предварительного натяжения.

Обычно пересечение вант закрепляют одиночными или двойными хомутами из круглой стали (рис. IV.21, а, б). В пределах узла ванты из канатов предохраняют от повреждения кожухами из оцинкованной стали или капрона. Гайки хомутов окончательно затягивают после предварительного натяжения сети. Для однократного закручивания гаек хомутов стабилизирующие ванты можно укладывать на «седло» из трубы, приваренной к стальной пластине (рис. IV.21, в).

Штампованные стальные накладные листы в узлах пересечения вант из стальных канатов и опорные листы с хомутами при вантах из арматурной стали (рис. IV.21, г—е) одновременно используются как монтажные столики для плит кровли. Одиночные штампованные накладные листы должны иметь два желоба. Накладные листы с одним желобом устанавливаются вдвоем. Для закрепления вант из двух арматурных стержней применяют гнутые накладные листы со стяжным болтом (рис. IV.21, ж).

Вантовую сеть шестиугольной структуры собирают на болтах, назначаемых из расчета прочности на срез, смятие и растяжение (рис. IV.21, з). Проектное положение вант в сети из стержней или канатов можно обеспечивать с помощью фиксаторов (рис. IV.21, и, к). К тросу-подбору стабилизирующие ванты прикрепляют аналогично растяжкам в двухпоясных покрытиях (см. рис. III.14).

Узлы примыкания вант к тросам жесткости должны воспринимать расчетные усилия, проскальзывание вант в них не допускается. На рис. IV.22 показано крепление вант к тросам жесткости разной конструкции. Детали узлов крепления вантовой сети к железобетонному опорному контуру аналогичны деталям висячих оболочек (рис. II.15). Концевые примыкания вант должны соответствовать методу предварительного напряжения сети.

Предварительное напряжение вантовой сети путем последовательного натяжения каждой ванты является наиболее простым и распространенным методом. В этом случае не требуется особой точности вычисления проектной длины вант. При последовательном подтягивании стабилизирующих вант один конец их закрепляют наглухо (см. рис. II.15, а—в), а на другом конце предусмат-

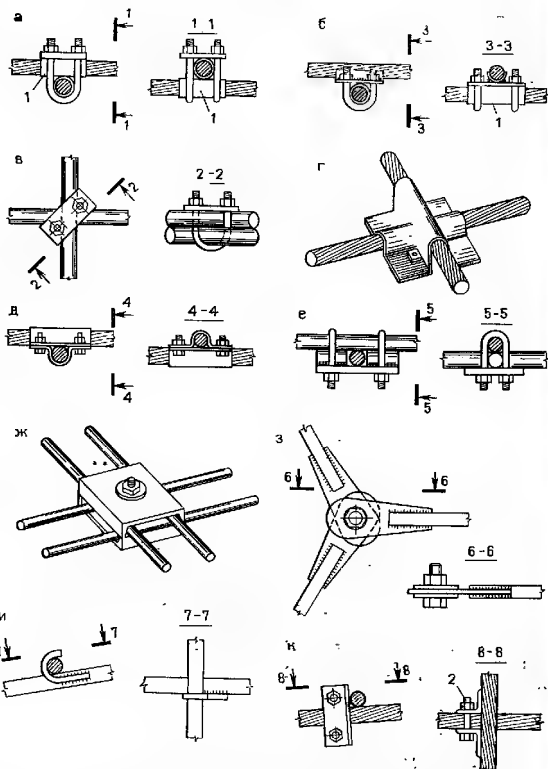


Рис. IV.21. Варианты узлов пересечения вант

а — на двойных комутах; б — на комутах с «седлом»; в — на одиночных комутах; г — с одиночной штампованной накладкой; д — с двумя штампованными накладками; е — на комутах с опорным листом; ж — на болту с накладками; з — на болту при шестиугольной ячейке сетки; и — фиксатор из стального крюка; к — фиксатор из упоров-уголков; 1 — кожух из оцинкованной стали или капрона; 2 — стяжные болты

ривают приспособление для механического натяжения гаечным ключом (см. рис. III.14, IV.23) или домкратом (см. рис. II.15, з, д). Для небольшого натяжения вант применяют обычные гаечные ключи. Ванты с контролем усилия натягивают тарифованным гаечным ключом, снабженным динамометром, или гидравлическим

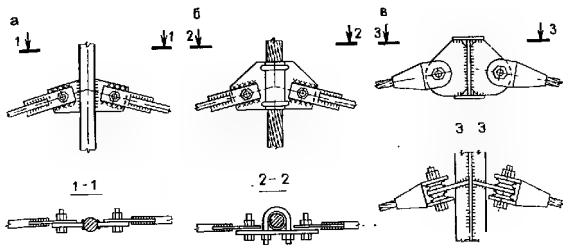


Рис. IV.22. Узлы примыкания вант к тросу жесткости

а — из арматурного стержня; б — из стального каната; в — из прокатного или сварного профиля

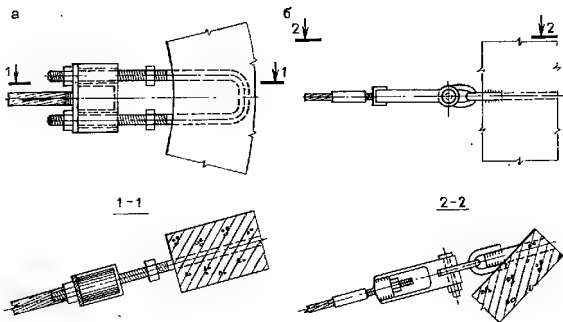


Рис. IV.28. Варианты примыкания стабилизирующих вант к опорному контуру покрытия с вантовой сетью и устройством для регулирования усилия натяжения

а — при спаренных выпусках; б — при металлической тяге

домкратом. Динамометрический гаечный ключ позволяет натягивать ванты с усилием до 350 кН.

Предварительное напряжение всей вантовой сети одновременно является более индустриальным методом. В данном случае все ванты закрепляют к опорному контуру без применения нарезных приспособлений. Однако одновременное натяжение всех вант нельзя произвести в любой системе покрытия. Вантовая сеть с шестиугольной структурой напрягается вся при оттягивании вверх или вниз центральной ячейки (см. рис. IV.20). В покрытии с поверхностью гиперболического параболоида (см. рис. IV.1) все несущие и стабилизирующие ванты могут быть напряжены одновре-

менно, если бортовой элемент несколько опустить, поворачивая на опорах (см. напряжение мембранной оболочки на рис. VI.11,б). Недостатки такого приема напряжения вантовой сети состоят в следующем: нужна высокая точность определения проектной длины каждой ванты, усложняется конструкция бортового элемента.

Глава V. Конструкции струнных покрытий, покрытий с висячими фермами и балками, комбинированных и подвесных систем

§ V.1. СТРУННЫЕ ПОКРЫТИЯ

Струнные покрытия являются разновидностью вантовых и предназначены для перекрытия сравнительно небольших пролетов — от 18 до 36 м. Предварительное напряжение прямолинейных вант обеспечивает необходимую жесткость пролетной части покрытия. К недостаткам струн относят высокие значения распоров и провисание под нагрузкой, что ограничивает длину перекрываемых пролетов. Из-за деформативности струн кровля должна быть достаточно эластичной и допускать значительные прогибы под действием снега и ветра. В качестве примера такой кровли могут служить профилированный настил, уложенный гофрамом поперек струн, плитный пенопласт и эластичный рулонный ковер.

Струны в покрытии можно располагать параллельно или радиально, но возможна лучевая ориентация струн в нескольких направлениях. При параллельных и радиальных направлениях струн конструктивное решение покрытия отличается сравнительной простотой. Схема покрытия с параллельными струнами приведена на рис. V.1. Радиальные струнные покрытия можно выполнять по схемам спирального покрытия, показанного на рис. II.5, в. Примерами покрытий с лучевым расположением струн в нескольких направлениях являются схемы на рис. V.2.

Стремление к использованию прямолинейного опорного контура в струнных покрытиях обусловило появление различных предложений по обеспечению его безызгибной работы. На рис. V.2 отражены некоторые схемы таких покрытий. Конструктивное решение струнных систем с безызгибным опорным контуром основано на принципе концентрации усилий в углах покрытия. Этот прием достаточно просто реализуется в покрытиях зданий с планом в виде квадрата, прямоугольника и ромба.

Введение в покрытие диагональных элементов с различной кривизной и расположение углов опорного контура на разных отметках позволяет эффектно варьировать формой сооружения (рис. V.2, б). Покрытия с лучевым расположением вант можно конструировать как разновидность висячих шатровых оболочек. При креплении вант к тросу жесткости «елочкой» несущие узлы проектируются аналогично рис. IV.22. Для удобного отвода воды с покрытия целесообразно углы опорного контура располагать на разных отметках.

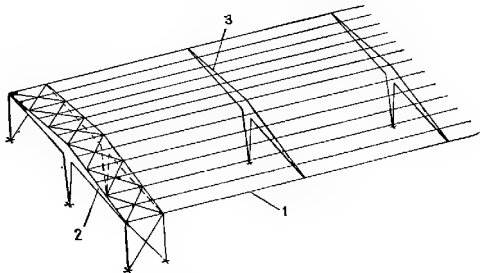


Рис. V.1. Схема многопролетного струнного покрытия с параллельными вантами
1 — струны; 2 — торцовый блок жесткости или контрфорс; 3 — промежуточные опоры

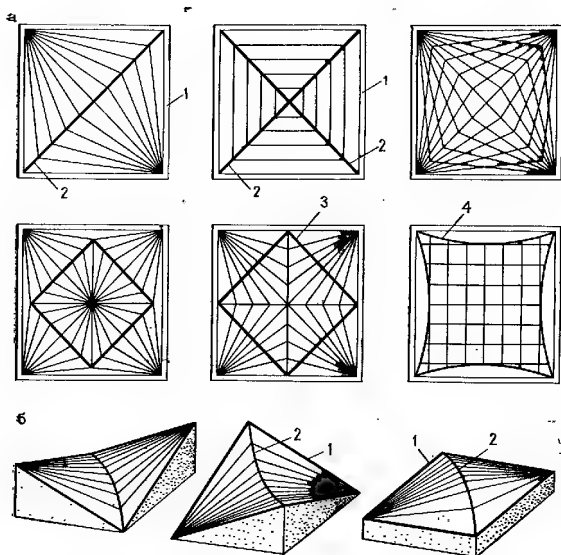


Рис. V.2. Примеры вантовых покрытий с прямолинейным безызгибным опорным контуром
а — схемы расположения вант в плане (все варианты, за исключением последнего, являются примерами струнных покрытий); б — формы покрытий с одним диагональным элементом;
1 — опорный контур; 2 — диагональная ванта или арка; 3 — промежуточная арка; 4 — трос-подбор

При применении струнных покрытий с безызгибным опорным контуром следует иметь в виду, что концентрация вант и значительных усилий в углах опорного контура усложняют решение последних.

§ V.2. ПОКРЫТИЯ С ВИСЯЧИМИ ФЕРМАМИ И БАЛКАМИ

Висячие¹ фермы и балки относятся к жестким вантам. Их применяют для стабилизации покрытий с легкой кровлей. В конструктивном решении висячих покрытий эта система является как бы промежуточной между висячими оболочками и мембранами, подкрепленными ребрами. По сравнению с висячими оболочками провисающие фермы и балки более металлоемки, поскольку для них вместо стержней и канатов из высокопрочной стали используют обычные стальные прокатные профили. От мембран, стабилизированных ребрами, покрытия с висячими фермами и балками отличаются тем, что настил в работе конструкции на растяжение не участвует. К преимуществам конструкций с висячими фермами и балками относятся применение более дешевого металла, более простые способы изготовления и монтаж.

Висячие фермы и балки располагают параллельно или радиально и используют в покрытиях с разнообразными формами, некоторые из них приведены на рис. V.3. Высоту поперечного сечения провисающей конструкции обычно назначают в пределах $1/40—1/60$ перекрываемого пролета. Висячие балки целесообразны при высоте сечения до 900 мм. Распор от провисающих конструкций передается на опорный контур в виде горизонтальных балок, наклонных арок или плоских и изогнутых из своей плоскости колец (рис. V.3, б, в). На верхний пояс висячих ферм и балок обычно укладывают стальной профилированный настил.

В качестве примера использования висячих ферм на рис. V.4 приведен плавательный бассейн на проспекте Мира в Москве, сооруженный к Олимпийским играм 1980 г. Здание бассейна в плане имеет овальную форму размером 126×104 м. В покрытии с формой гиперболического параболоида использованы висячие фермы пролетом 40—104 м. Фермы расположены с шагом 4,5 м и передают распор на опорный контур из двух железобетонных арок пролетом по 110 м. Арки смонтированы под углом 30° к горизонту и поддерживаются колоннами, установленными за трибунами.

Интересными примерами покрытий с использованием провисающих конструкций являются Олимпийский гимнастический зал диаметром 67 м и здание общественных собраний с эллиптической формой в плане размером $110,7 \times 82,9$ м в Токио, павильон аттракционов размером 240×67 м в Сент-Хелнер на о. Джерси (Великобритания), с которыми можно ознакомиться по литературе [1, 4, 12, 35, 38].

¹ В литературе встречается и иное название — провисающие.

Рис. V.3. Покрытия с висячими фермами

а — примеры конструктивных схем; *б* — усиления в опорном узле висячей фермы; *в* — вариант примыкания висячей фермы к опорному контуру; 1 — бортовой элемент; 2 — промежуточная арка; 3 — ребра; 4 — фасонка фермы; 5 — валик

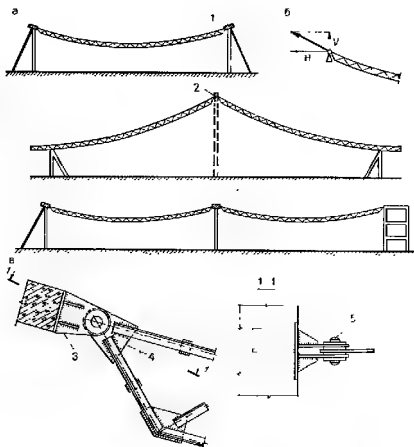
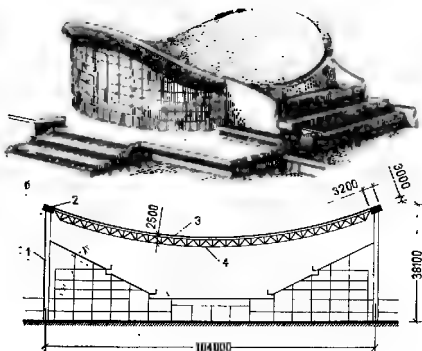


Рис. V.4. Плавательный бассейн в Олимпийском комплексе на проспекте Мира в Москве (1980 г.)

а — общий вид здания; *б* — схематичный поперечный разрез; 1 — колонны; 2 — наклонные железобетонные арки; 3 — оцинкованный профилированный настил, утеплитель и гидроизоляционный ковер; 4 — висячие фермы параболического очертания с шагом 4,5 м



§ V.3. КОМБИНИРОВАННЫЕ И ПОДВЕСНЫЕ СИСТЕМЫ

В комбинированных системах покрытий гибкие ванты и жесткие элементы работают совместно, что приводит к взаимному их облегчению. Жесткие элементы выполняют из балок или ферм и обычно располагают перпендикулярно к вантам (рис. V.5). Та-

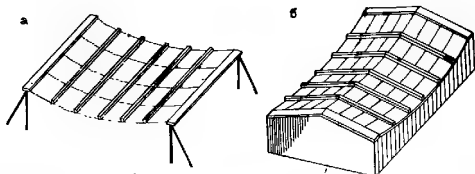


Рис. V.5. Комбинированные системы покрытий
а, б — на прямоугольном плане; в — на плане криволинейного очертания

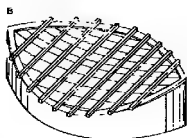
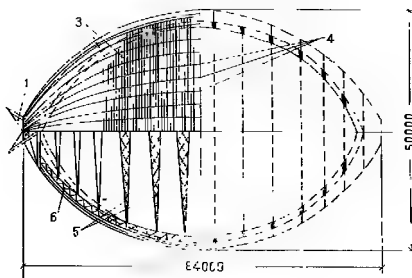
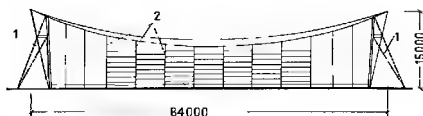


Рис. V.6. Конструкция павильона Совета Европы на Всемирной выставке в Брюсселе

1 — основные опоры; 2 — стойки контура; 3 — поперечные ванты диаметром 5 мм; 4 — продольные ванты диаметром 30 мм; 5 — поперечные фермы распорки; 6 — решетчатый пояс



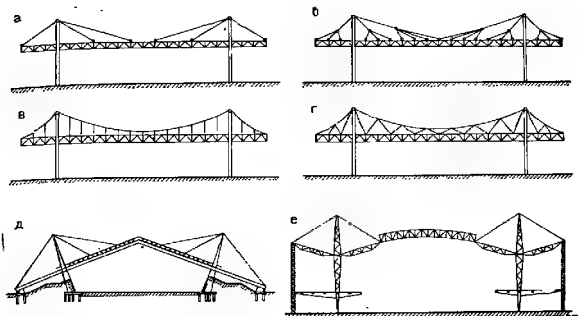


Рис. V.7. Схемы подвесных покрытий

а — б — варианты устройства лодвесок; д — схема покрытия зимнего Олимпийского стадиона в Скво-Вэлли (США, 1960 г.); е — схема павильона СССР на выставке в Брюсселе (1958 г.)

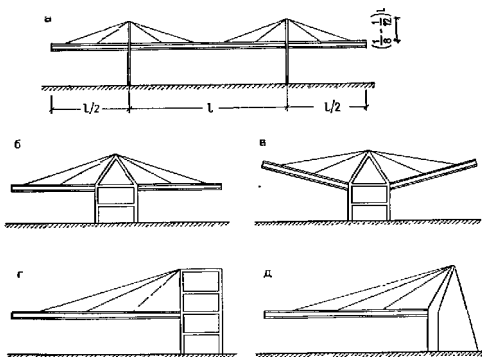
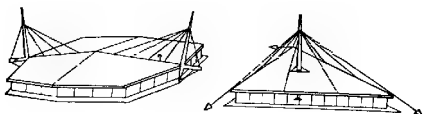


Рис. V.8. Схемы консольных подвесных покрытий

а — в — двухконсольные системы; г, д — одноконсольные системы

Рис. V.9. Пространственные подвесные покрытия



кое конструктивное решение стабилизирует форму покрытия и способствует распределению неравномерных нагрузок на несколько несущих вант.

В качестве примера устройства комбинированного покрытия на рис. V.6 показано конструктивное решение павильона Совета Европы на Всемирной выставке в Брюсселе в 1958 г. В покрытии этого сооружения продольные ванты работают совместно с поперечными фермами-распорками, которые имеют рыбообразное очертание и опираются на трубчатые стойки по периметру здания.

В 1976 г. покрытие комбинированной системы было возведено над катком с искусственным льдом в Эври (Франция). Конструктивное решение покрытия соответствует схеме на рис. V.5,а, только бортовые железобетонные элементы расположены на разных уровнях. Сооружение имеет размер в плане 70×36 м. Пролет 70 м перекрыт 13 вантами, поперек которых уложены трехгранные трубчатые стальные фермы. Стабилизация формы покрытия обеспечивается массой ферм, профилированного настила, утеплителя и гидроизоляционного ковра.

Подвесные покрытия состоят из жесткой конструкции и внешних вант, закрепленных на стойках или пилонах. Такие покрытия имеют разнообразные конструктивные решения (рис. V.7—V.9). Вантовые подвески с инженерной точки зрения можно эффективно использовать в плоскостных и пространственных системах покрытий: они перераспределяют усилия в жестких балках и фермах, позволяя уменьшить их поперечное сечение, создают возможность перекрывать значительные пролеты. Подвесные покрытия имеют большую жесткость, чем вантовые системы. Однако эти покрытия не нашли широкого применения по следующим основным причинам: при наружном расположении ванты подвергаются коррозии, что усложняет и удорожает их эксплуатацию; воздействие температурных перепадов на ванты вызывает вертикальные смещения подвешенной системы; конструктивные схемы ограничивают планировочные решения зданий.

В подвесных покрытиях с параллельным расположением несущих систем (см. рис. V.7, V.8) шаг конструкций составляет не менее 10 м. Кровлю выполняют с применением решетчатых прогонов или металлических крупноразмерных панелей. В пространственных подвесных покрытиях (рис. V.9, XI.12) жесткость системы обеспечивается большой собственной массой плит кровли или предварительным напряжением оттяжек.

Глава VI. Мембранные покрытия

§ VI.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Мембранные оболочки являются разновидностью всяких покрытий, но по конструкции они отличаются от всяких оболочек тем, что удачно совмещают в себе несущую и ограждающую функции. Сохраняя все преимущества всяких конструкций, мем-

бренные оболочки обладают широкими возможностями индустриализации изготовления и монтажа в связи с доставкой полос металла с завода к месту возведения здания в рулонах. При перекрытии больших пролетов толщина металлической мембраны по условию прочности как правило, не превышает 1—1,5 мм, что обуславливает высокую экономичность покрытия.

По соображениям коррозионной стойкости мембраны из листовой стали обычно выполняют толщиной не менее 3—4 мм. В случае применения листов из алюминиевых сплавов толщину мембранной оболочки назначают только по условию прочности, поскольку алюминиевые конструкции практически не подвергаются коррозии.

Приоритет в разработке и возведении первого мембранного покрытия из стальных лент принадлежит выдающемуся русскому ученому и инженеру В. Г. Шухову (1896 г., павильон на Всероссийской художественной и промышленной выставке в Нижнем Новгороде). За рубежом листовое покрытие появилось впервые только через 35 лет (элеватор в США). Практика современного отечественного строительства большепролетных сооружений показывает, что у мембранных покрытий большое будущее.

Формы мембранных оболочек аналогичны форме висячих оболочек с параллельными и радиальными вантами, покрытиям с вантовыми сетями, т. е. весьма и весьма разнообразны. Аналогичны также и очертания сооружений в плане. При круглом плане провисающая мембрана может иметь сферическую или коническую поверхность. В покрытии с конической оболочкой усилия примерно вдвое больше, чем со сферической мембраной при одинаковых геометрических характеристиках и нагрузке, поэтому возможности использования сферических мембран более перспективны.

Стрелу провисания мембранных оболочек рекомендуется назначать в пределах $\frac{1}{15}$ — $\frac{1}{25}$ перекрываемого пролета. Для восприятия распора контурные конструкции мембран решаются так же, как и при вантовых системах.

§ VI.2. СТАБИЛИЗАЦИЯ МЕМБРАН

Основная проблема при проектировании мембранных оболочек состоит в стабилизации формы поверхности покрытия, так как стальной или алюминиевый лист практически не сопротивляется изгибу. Задача обеспечения необходимой жесткости мембранного покрытия решается путем использования следующих конструктивных мероприятий, большинство из которых связано с предварительным растяжением оболочки.

Пригруз покрытия. Такой метод стабилизации поверхности покрытия целесообразен для провисающих мембран, прототипом которых служат висячие оболочки с параллельным или радиальным расположением вант (рис. II.1; II.5, а б; IV.4). В данном случае используют массу утеплителя, укладываемого плитно или в виде бетонной рубашки. Основным условием обеспечения стабилизации оболочки считают превышение нагрузкой от массы по-

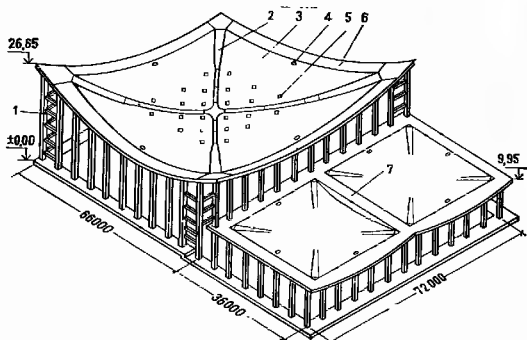


Рис. VI.1. Универсальный спортивный зал на 5 тыс. зрителей в Измайлове (Москва, 1980 г.)

1 — угловые связи между колоннами; 2 — диагональные подкрепляющие полосы из стали толщиной 20 мм; 3 — мембрана из нержавеющей стали толщиной 2 мм; 4 — водосточные воронки; 5 — фонари; 6 — монолитный железобетонный опорный контур; 7 — стальная распорка

крытия ветрового отсоса. В качестве пригруза покрытия можно использовать массу центрального кольца, светового или аэрационного фонаря, водосточных труб и лотков, подвешиваемого технологического или инженерного оборудования.

Эффект стабилизации формы поверхности мембраны возрастает, если жесткий плитный утеплитель уложить с зазорами 10—12 см, которые затем в короткий промежуток времени залить расширяющимся раствором. Размер плит и щелей между ними определяют необходимое усилие предварительного напряжения покрытия.

Примером использования мембраны, стабилизированной пригрузом, является покрытие универсального спортивного зала на 5000 зрителей в Измайлове (Москва), сооруженного к Олимпийским играм 1980 г. (рис. VI.1). Основной зал размером 66×72 м перекрыт одной мембраной, тренировочный размером 36×72 м — двумя мембранами. Все мембраны выполнены из нержавеющей стали толщиной 2 мм и стабилизированы утеплителем и кровлей (пенобетон толщиной 150 мм, армированная цементная стяжка, стеклоткань с кремнийорганическими смолами и фольгоизол). Форма поверхности мембран образована сочленением четырех цилиндрических секторов. Нагрузка от мембраны на опорный контур передается только в углах покрытия через диагональные подкрепляющие элементы, поэтому опорный контур испытывает одни сжимающие усилия.

Напрягающие ванты. Использование системы вант для стабилизации провисающих мембран предложено И. Г. Людовским

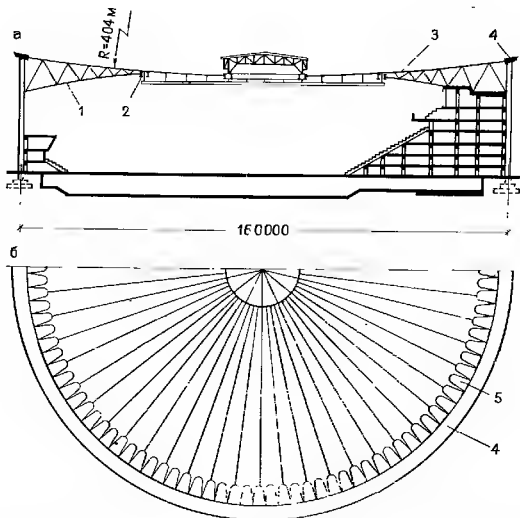
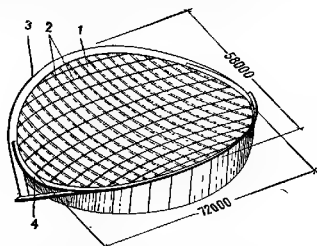


Рис. VI.2. Мембранное покрытие диаметром 160 м спортивного зала на 25 тыс. зрителей в Ленинграде

а — поперечный разрез зала; б — план покрытия; 1 — радиальные вантовые фермы; 2 — промежуточное стальное кольцо диаметром 72 м; 3 — сферическая мембрана из стального листа толщиной 6 мм; 4 — сборно-монолитное железобетонное опорное кольцо сечением $5 \times 1,05$ м; 5 — эллиптические вырезы в приконтурной зоне

Рис. VI.3. Конструктивная схема мембранного покрытия катка в Минске

1 — мембрана из 63 стальных оцинкованных лент толщиной 1,5 мм; 2 — стабилизирующие ванты из стальных закрытых оцинкованных канатов диаметром 22 мм с шагом 2 м; 3 — плоские железобетонные арки; 4 — сопрягающие арки оловянного контура



и А. М. Ивановым. В частности, им принадлежит приоритет в способе натяжения мембранных покрытий вантами аналогично схемам, показанным на рис. III.1,д; III.5,е. В период монтажа покрытия вантовую систему можно использовать в качестве подмостей для раскатки рулонированных полос мембраны. Предва-

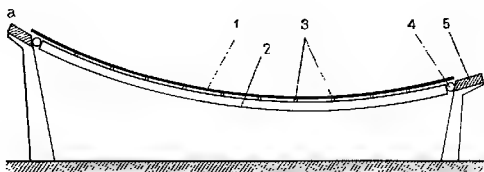


Рис. VI.4. Схемы мембранно-балочных покрытий

a — мембрана с цилиндрической поверхностью (поперечный разрез); *б* — шатровая мембрана; 1 — мембрана; 2 — продольные ребра; 3 — поперечные ребра; 4 — шарнирное устройство (опора продольного ребра); 5 — бортовой элемент; 6 — меридиональные ребра

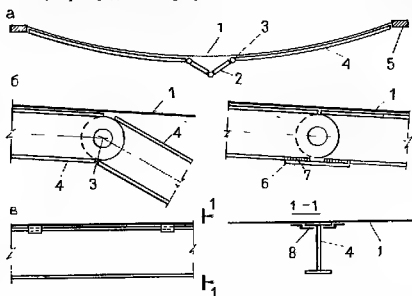


Рис. VI.5. Стабилизация мембранной оболочки предварительно напряженным продольным ребром

a — поперечный разрез (схема); *б* — сопряжение подвижного звена с ребром до напряжения мембраны и после напряжения; *в* — соединение ребра с мембраной; 1 — мембрана; 2 — пара звеньев; 3 — шарниры; 4 — продольные ребра; 5 — бортовой элемент; 6 — монтажная накладка; 7 — сварное или болтовое соединение; 8 — фиксаторы

рительное напряжение покрытия производят на значение, которое не меньше разности нагрузок от ветрового отсоса и собственной массы мембраны.

Стабилизация мембранного покрытия вантовыми фермами осуществлена в спортивном зале в Ленинграде (рис. VI.2). Вырезы эллиптической формы в околоконтуриной зоне мембраны были

предусмотрены для устранения влияния местных напряжений и обеспечения свободы кольцевых деформаций мембраны. Такое крепление мембранной оболочки к опорному контуру называют точечным. Практика возведения первого покрытия показала, что влияние краевого эффекта незначительно, поэтому при проектировании подобных мембранных покрытий можно отказаться от устройства вырезов в околоконтурной зоне.

Мембранная оболочка крытого катка в Минске стабилизирована системой параллельных вант, как показано на рис. VI.3. Простота решения мембранной конструкции достигнута Минск-проектом за счет придания поверхности покрытия формы гиперболического параболоида.

Система ребер. Включение в работу мембраны продольных ребер, способных воспринимать изгибающие моменты, стабилизирует форму поверхности покрытия с прямоугольным и круглым планом (рис. VI.4). При таком способе обеспечения жесткости покрытия листовая оболочка может волнообразно прогибаться только на участках между ребрами. Для устранения подобного изгиба мембраны между продольными ребрами предусматривают легкие поперечные ребра с шагом около 3 м.

Деформируясь совместно с листовой оболочкой, продольные ребра выполняют функцию жестких нитей. Очертание продольных ребер рекомендуется назначать по квадратной параболе. Конструкция ребер может быть в виде балки или фермы с высотой поперечного сечения $h = (1/70 - 1/90) l$. При больших пролетах высота сечения продольных ребер становится существенной, что приводит к ухудшению интерьера сооружения.

Для уменьшения сечения продольных ребер Свердловским архитектурным институтом предложено стабилизацию мембран осуществлять предварительным растяжением оболочки следующим способом. В каждом продольном ребре предусматривают два шарнирно-соединенных звена, суммарная длина которых больше, чем длина занимаемого или участка дуги ребра (рис. VI.5). При приведении пары звеньев в положение оси продольного ребра последнее включается в растяжение мембраны.

Стабилизация мембранных оболочек ребрами осуществлена в покрытии стадиона с эллиптическим планом размером 224×183 м, сооруженного в Москве к Олимпийским играм 1980 г. (рис. VI.6) и в покрытии плавательного бассейна пролетом 60 м в Харькове. Жесткость мембраны над стадионом обеспечивается системой радиальных висячих ферм и кольцевых ребер, цилиндрического покрытия бассейна — за счет параллельно установленных сплошных ребер аналогично схеме на рис. VI.4, а.

Седловидная форма и подкрепляющие элементы. Для стабилизации формы покрытия можно использовать мембрану с седловидной поверхностью и специальные подкрепляющие элементы. Если жесткость мембранной оболочки, имеющей форму гиперболического параболоида, над катком в Минске была обеспечена за счет использования напрягающих вант, то мембрана в покрытии велотрека в Крылатском (Москва) подкреплена сетью в виде

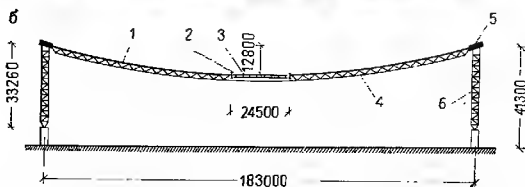
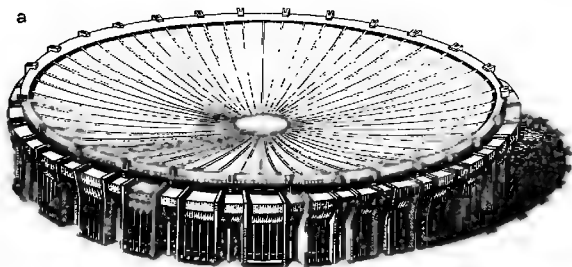


Рис. VI.6. Универсальный крытый стадион на 45 тыс. зрителей в Москве (1980 г.)

а — общий вид здания стадиона; б — поперечный разрез (схема); 1 — мембрана из стального листа толщиной 5 мм; 2 — центральное кольцо размером $30 \times 24,5$ м; 3 — плита для технологического оборудования; 4 — радиальные висячие фермы с промежуточными кольцевыми ребрами; 5 — монолитное железобетонное опорное кольцо с поперечным сечением $5 \times 1,75$ м; 6 — стойки с шагом 20 м по периметру покрытия

опорных полос и прогонов. Конструктивная схема покрытия велотрека показана на рис. VI.7.

Покрывтие образоваио из двух гиперболических параболоидов и в плане имеет форму эллипса с размером 168×138 м. Во время монтажа стальная мембрана была уложена на подкрепляющую сеть, опорные полосы которой расположены с шагом 6,3 м, а прогоны — 3 м. Под действием нагрузки мембрана в основном испытывает растяжение вдоль ската, в продольном направлении местное провисание мембраны между опорными полосами предотвращается прогонами.

Для сокращения сроков строительства велотрека железобетонные арки опорного контура были заменены стальными. Внутренние арки зацементированы в массивных железобетонных фундаментах, которые под полотном велотрека соединены затяжками для восприятия распора покрытия.

Притягивание поперечных ребер. Стабилизация мембранного покрытия с цилиндрической формой поверхности может быть достигнута путем использования поперечных ребер, которые показаны на рис. V.5, а для комбинированной вантавой системы. Предварительное напряжение мембраны осуществляют притягиванием концов ребер к анкерным фундаментам в земле или к оголовкам

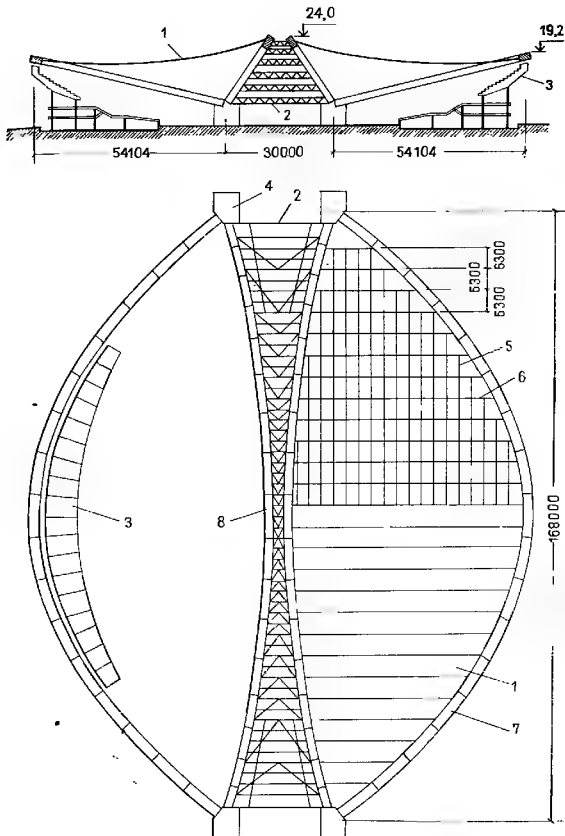


Рис. VI.7 Схема конструкций покрытия велотрека на 6 тыс. зрителей в Крылатском (Москва, 1980 г.)

1 — стальная мембрана толщиной 4 мм; 2 — фермы пролетом от 3 до 26 м; 3 — консоли трибун; 4 — железобетонные фундаменты; 5 — стальные прогоны из гнутых профилей; 6 — опорные полосы из стали с сечением 750×6 мм; 7 — наружные стальные арки с коробчатым поперечным сечением 3,04×2,04 м; 8 — внутренние стальные бесшарнирные арки с таким же сечением

Рис. VI.8. Схема мембранного покрытия Дворца спорта имени В. И. Ленина в г. Фрунзе

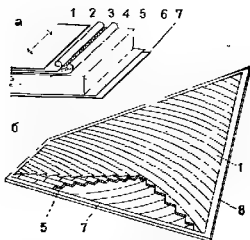
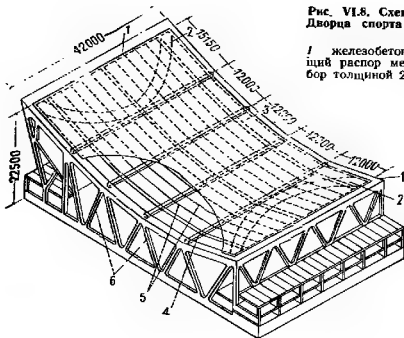


Рис. VI.9. Конструкция двухслойного мембранного покрытия

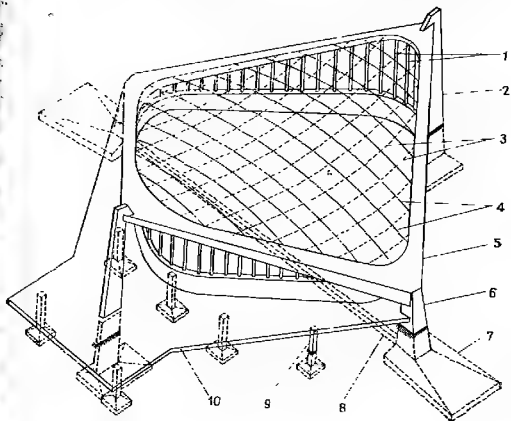
а — устройство теплой кровли; б — общая схема покрытия с квадратным планом; 1 — стабилизирующие ленты; 2, 4 — полиэтиленовая пленка; 3 — смазка; 5 — утеплитель; 6 — пароизоляция (в необходимом случае); 7 — несущие ленты; 8 — опорный контур (железобетонный или стальной)

фахверковых стоек. При напряжении покрытия поверхность листовой оболочки приобретает призматическую конфигурацию, в поперечном направлении мембрана несколько искривляется, повторяя выгиб ребер. В случае большой ширины мембраны на ребра расходуется значительное количество металла.

Данный способ стабилизации мембранной оболочки использован в покрытии Дворца спорта имени В. И. Ленина в г. Фрунзе (рис. VI.8). В этом покрытии по мощным поперечным ребрам уложены сравнительно легкие продольные ребра, дополнительно стабилизирующие мембрану и служащие направляющими прогонами при раскатке листовых рулонов.

Двухслойная мембрана. Предварительное напряжение мембранных оболочек с поверхностью гиперболического параболоида осуществляют притягиванием стабилизирующих лент к опорному контуру. Аналогично покрытию с вайтовой сетью (см. рис. IV.1) мембрану выполняют из двух слоев лент, расположенных по направлениям главных кривизн поверхности оболочки. На рис. VI.9

защитное покрытие, в котором между алюминиевыми несущими и стабилизирующими лентами уложен утеплитель. Стабилизирующие ленты в таком покрытии укладывают внахлестку с заделкой швов каучуковым герметиком, поэтому устройства какой-либо защиты по оболочке не требуется. Для обеспечения равномерного натяжения стабилизирующих лент на утеплитель укладывают два



6

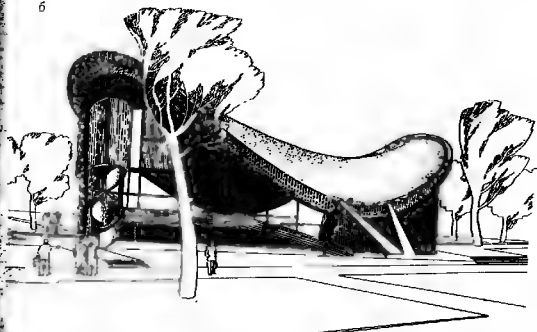


Рис. VI.10. Сооружения с двухслойными мембранными покрытиями в Москве

конструктивная схема павильона «Охота и охотничье хозяйство» на ВДНХ СССР: 1 — жесткие стойки; 2 — угловые стойки; 3 — несущие алюминиевые ленты; 4 — стабилизирующие алюминиевые ленты; 5 — железобетонный опорный контур; 6 — контрфорс; 7 — цемент; 8 — затяжка; 9 — колонны перекрытия первого этажа; 10 — плита перекрытия; 6 — общий вид конференц-зала стоматологического института

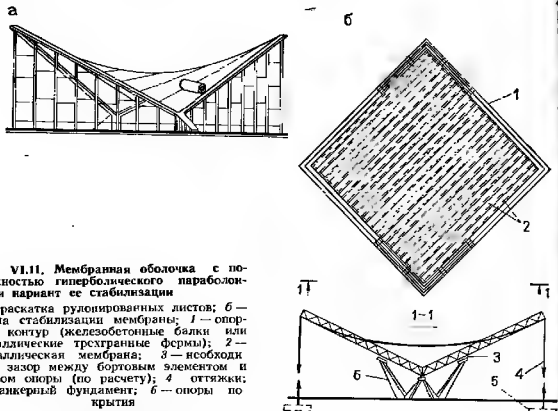


Рис. VI.11. Мембранная оболочка с поверхностью гиперболического параболоида и вариант ее стабилизации

а — раскатка рулонированных листов; б — схема стабилизации мембраны; 1 — опорный контур (железобетонные балки или металлические трехгранные фермы); 2 — металлическая мембрана; 3 — необходимый зазор между бортовым элементом и верхом опоры (по расчету); 4 — оттяжки; 5 — анкерный фундамент; 6 — опоры по крытия

слоя полиэтиленовой пленки, имеющей смазку. Предварительно напряжение оболочки производят путем последовательного подтягивания стабилизирующих лент, концы которых крепят к опорному контуру с помощью натяжных приспособлений.

Конструкция двухслойных мембран предложена, разработана и внедрена в практику строительства ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. Утепленные оболочки апробированы в покрытиях павильона «Охота и охотничье хозяйство» на ВДНХ СССР и конференц-зала стоматологического института в Москве (рис. VI.10). Павильон на ВДНХ имеет квадратную форму плана с размером 46,5×46,5 м, конференц-залу придана эллиптическая форма плана с размером по осям 26×22 м.

Притягивание углов гипара. При конструктивном решении опорного контура, допускающем внизу покрытия некоторый угол поворота бортовых элементов, возможна стабилизация мембранной оболочки с поверхностью гипара на квадратном плане путем притягивания углов покрытия к анкерным фундаментам, как показано на рис. VI.11. При таком способе напряжения мембраны рулонированные листы раскатывают вдоль прямолинейных образующих. Подмостями в период монтажа может служить узкий мост который передвигается по направляющим, подвешенным к бортовым элементам так, что расстояние между ними в разных местах обеспечивается постоянным.

§ VI.3. УЗЛЫ И ДЕТАЛИ МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ

Стальные ленты мембраны после раскатки и регулирования соединяют внахлестку сплошными сварными швами или точечной сваркой (электрозаклепками). Как показала практика строитель-

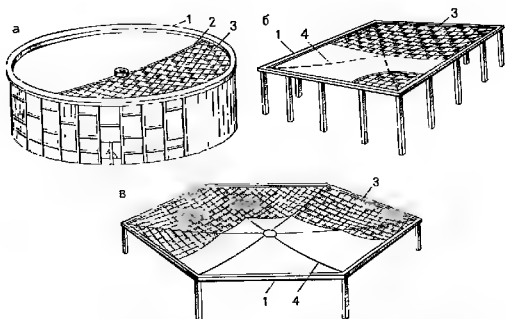


Рис. VI.12. Покрытия с провисающими мембранами из переплетенных лент
а, б, в — оболочки с круглым, квадратным, шестиугольным планом соответственно; 1 — опорный контур; 2 — теплая кровля; 3 — переплетенные алюминиевые листы; 4 — подкрепляющая тросовая система

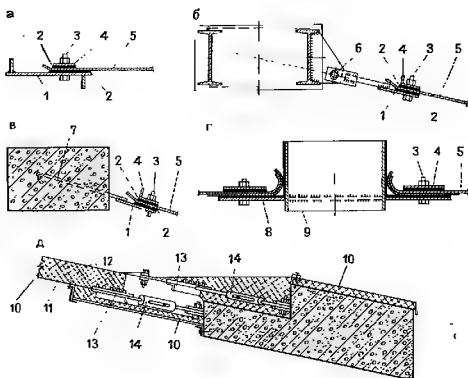
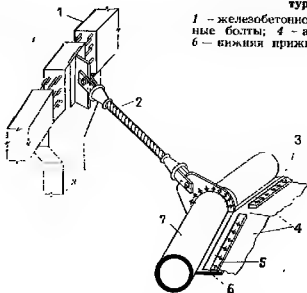


Рис. VI.13. Детали крепления лент в мембранных покрытиях
а — непосредственное крепление к металлическому опорному контуру; б — выносное присоединение к стальному опорному контуру; в — то же, к железобетонному; г — оформление отверстия; д — крепление двухслойной мембраны к железобетонному бортовому элементу; 1 — нижний прижимной элемент (стальная полоса); 2 — фрикционный слой (пленка толщиной 1 мм из эпоксидного клея с присыпкой корундовой крошкой или кварцевым песком); 3 — высокопрочный болт; 4 — верхний прижимной элемент; 5 — алюминиевая лента; 6 — С-образный шарнир; 7 — анкер; 8 — фланец (стальной лист с отверстием); 9 — труба; 10 — Утеплитель; 11 — несущая алюминиевая лента; 12 — стабилизирующая алюминиевая лента; 13 — прижимной захват; 14 — натяжное устройство

Рис. VI.14. Крепление ленточной мембраны к опорному контуру через промежуточное кольцо

1 — железобетонное опорное кольцо; 2 — тяз; 3 — высокопрочные болты; 4 — алюминиевые ленты; 5 — прижимные планки; 6 — нижняя прижимная пластина; 7 — промежуточное стальное кольцо



ства, для снижения трудоемкости возведения покрытия целесообразно стальные ленты предварительно сваривать на заводе в полотнища, а монтажную сварку полотнищ производить автоматически под слоем флюса.

В вогнутых и шатровых покрытиях с круглым планом полотнища выполняют в форме сектора.

При сварке алюминиевых листов происходит разупрочнение металла в околошовной зоне. Для устранения сварочных работ на провисающих мембранных оболочках из алюминиевых сплавов рекомендуется поверхность образовывать путем переплетения длинноразмерных лент (рис. VI.12).

Конструктивное решение и способ монтажа мембран из переплетенных лент разработаны в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. Ленты располагают в двух взаимно перпендикулярных направлениях и переплетают в шахматном порядке на всей площади покрытия или только на части. После переплетения концы лент прикрепляют к опорному контуру с помощью прижимных планок и высокопрочных болтов, как показано на рис. VI.13, а—в. Монтаж покрытия завершают укладкой на мембрану традиционной теплокровли с учетом превышения нагрузкой от ее массы ветрового отсоса.

Алюминиевые ленты переплетают или в проектном положении на строительных лесах или внизу на уровне земли с использованием спланированной и подготовленной площадки. Во втором случае ленточную мембрану прикрепляют к промежуточному стальному кольцу, вместе с которым ее затем поднимают на проектную отметку и присоединяют тязами к основному опорному кольцу (рис. VI.14).

Отвод атмосферной воды с вогнутых мембран в принципе организуют аналогично тому, как в покрытиях с радиальными ваннами (рис. II.5, а). При горизонтальном расположении опорного контура вода с покрытия удаляется по водоотводящим трубами, подвешенным к мембране.

Для сбора воды в трубы используют традиционные воронки или центральное кольцо, на которое опирается световой фонарь. В ленточной мембране для установки воронок выполняют обрамленные отверстия, как изображено на рис. VI.13,2. Из соображений организации интерьера сооружения водосточные трубы прикрывают декоративным подвесным сектором или совмещают с подвесным осветительным оборудованием.

Глава VII. Восприятие распора в висячих покрытиях

§ VII.1. ОПОРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

В висячих покрытиях распор от вант или мембраны передается на опорный контур, от ударного решения которого зависит целесообразность всей несущей системы сооружения. Опорная конструкция является не только ответственной, но и наиболее дорогой частью покрытия, поэтому выбор простого и надежного решения ее определяет экономическую эффективность покрытия в целом.

При замкнутом опорном контуре в виде жесткой плоской или пространственной конструкции решение проблемы восприятия распора значительно упрощается. В радиальных покрытиях, покрытиях с вантовыми сетями и аналогичных мембранных системах замкнутый жесткий контур является самоуравновешенной конструкцией, внешне безраспорной. Решение вопроса восприятия распора вант или мембраны сводится к назначению материала и размеров поперечного сечения опорной конструкции, при которых обеспечивается требуемая несущая способность на все комбинации силовых воздействий в период монтажа и эксплуатации. В частности, размеры сечения железобетонного опорного контура можно предварительно назначать равными:

для арочных бортовых элементов

$$h = (1/30 - 1/60) l, \quad b = (1/3 - 1/4) h;$$

для кольцевых бортовых элементов

$$h = (1/60 - 1/100) l, \quad b = (1/150 - 1/300) l;$$

для прямолинейных бортовых элементов

$$h = (1/10 - 1/15) l_0, \quad b = (1/2 - 1/3) h,$$

где h — высота поперечного сечения (в плоскости опорного контура); l — перекрываемый пролет; l_0 — пролет бортового элемента.

При разомкнутом опорном контуре ванты или мембрану закрепляют по противоположным сторонам здания, поэтому распор от них необходимо передавать на фундаменты специальными конструкциями (рис. VII.1). Использование жесткой многоярусной рамы (рис. VII.1,а) для восприятия распора целесообразно при наличии пристроя к основному пролету, а также при слабых грунтах. Наклонные оттяжки (рис. VII.1,б) загромаздывают пространство снаружи здания. Для уменьшения деформаций оттяжку выпол-

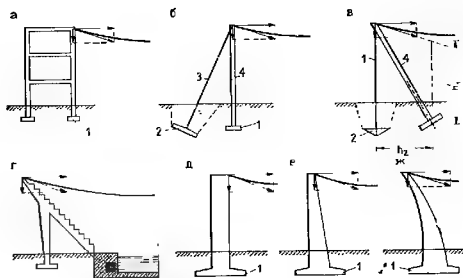


Рис. VII.1. Схемы опорных конструкций висячих покрытий при разомкнутом наружном контуре

а — жесткая рама; б — подкосная система с наклонной оттяжкой; в — то же, с вертикальной; г — трибуна; д, е, ж — пилоны; 1 — фундамент; 2 — анкерный фундамент; 3 — оттяжка; 4 — стойка

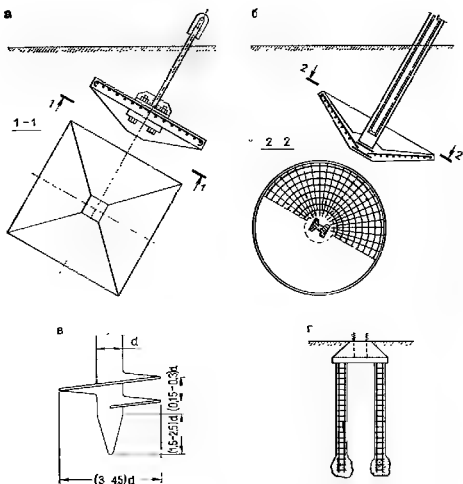


Рис. VII.2. Устройство анкерных фундаментов
а — плитный фундамент; б — открытая коническая оболочка; в — винтовая свая; г — набивные сваи с увиренной пяткой

ляют железобетонной предварительно-напряженной или из стальных прокатных профилей.

При вертикальных оттяжках и наклонных стойках (рис. VII.1, *в*) загромаздается внутреннее пространство здания. Однако преимущество этого решения состоит в том, что для анкеровки оттяжек используют массу стены. В сооружениях зрелищно-спортивного назначения распор от всячего покрытия могут воспринимать конструкции трибуны (рис. VII.1, *г*). В случае необходимости распор от вант и мембран можно передавать на пилоны различной формы (рис. VII.1, *д—ж*).

§ VII.2. АНКЕРНЫЕ ФУНДАМЕНТЫ

Анкерные фундаменты предназначены для передачи на грунт выдергивающих усилий. Конструкции их могут быть различными (рис. VII.2). Плитные фундаменты и конические оболочки воспринимают усилие от оттяжек за счет массы насыпного грунта (рис. VII.2, *а, б*). Открытые конические оболочки целесообразнее плоских плит.

Винтовые сваи имеют стальной пустотелый или железобетонный ствол круглого сечения и башмак с винтовой лопастью размером 0,4—1,2 м. Башмаки изготавливаются литыми или сварными (рис. VII.2, *в*). Сваи закручивают специальной установкой, которая способна погружать их на глубину до 8 м и с наклоном до 45° к вертикали. Набивные сваи изготавливают непосредственно на строительной площадке (рис. VII.2, *г*). Они могут быть различных типов.

§ VII.3. АНКЕРНЫЕ КРЕПЛЕНИЯ ВАНТ

Выбор анкерного устройства зависит от материала вант, конструкции бортового элемента и метода предварительного напряжения покрытия. Концевые крепления вант из стальных канатов показаны на рис. VII.3, из арматурных стержней — на рис. VII.4, из пучков высокопрочной проволоки — на рис. VII.5.

Для стальных канатов наиболее простым анкерным устройством является петля с коушем (рис. VII.3, *а—в*). Зажимы для закрепления концов канатов могут быть разной конструкции, в табл. VII.1 приведены справочные данные для одинарных сжимов в виде дужки с планкой (рис. VII.3, *а*). В зависимости от диаметра каната разрывное усилие ванты с таким соединением понижается на 20—25%. Для петли с влитым коушем (рис. VII.3, *б*) длину перевязки назначают примерно равной 25 диаметрам каната. Место сплетки плотно обматывают мягкой вязальной проволокой диаметром 1—1,5 мм. Прочность ванты со сплеткой понижается на 10—25%.

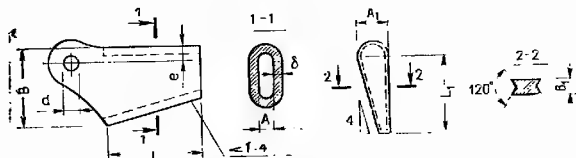
Концы канатов запрессовывают с помощью алюминиевых или стальных трубок овального сечения (рис. VII.3, *в*). Такое анкерное закрепление применяют для канатов диаметром до 20 мм. Плотное обжатие трубок обеспечивает прочность соединения, равную 90—95% прочности каната. Мягкий материал трубок при обжатии

Таблица VII.1. Сжимы для стальных канатов

Диаметр каната, мм	Число сжимов на соединение	Расстояние между сжимами, мм	Размеры сжима, мм				Масса сжима, кг
			диаметр стержня дужки	толщина планки	ширина планки	длина планки	
8—8,8	3	100	10	10	25	45	0,18
9,8—12,5	3	100	10	12	34	54	0,26
14—15,5	3	100	12	14	40	65	0,43
16,5—17	3	110	16	16	45	75	0,7
18—19	4	110	16	16	52	80	0,85
20—21,5	5	110	16	16	52	85	0,9
22—23,5	5	130	20	20	60	92	1,45
25—27	5	150	20	22	60	100	1,7
28	6	180	20	22	60	100	1,7
29,5—33	6	200	22	24	70	110	2,4
35,5—36	6	225	24	24	80	120	2,8
38,5—39	7	250	24	24	80	120	2,8
41—45	7	275	25	28	90	130	3,9
46—49	8	300	25	28	90	130	3,9
50	8	300	28	30	100	140	5,2
55	9	350	28	30	100	140	5,2

Примечания: 1. Затягивающие гайки сжимов следует размещать со стороны рабочей ветви каната. 2. Материал деталей сжима сталь марки ВСт3кп2.

Таблица VII.2. Клиновые зажимы с литым корпусом для стальных канатов



Диаметр каната, мм	Размеры зажима, мм								Масса корпуса с клином, кг
	A	B	L	δ	e	A ₁	B ₁	L ₁	
От 10 до 12	14	85	120	10	16	36	12	90	1,3
» 12 » 14	16	95	130	10	17	40	14	100	2,3
» 14 » 17	20	105	140	12	20	42	18	110	3,1
» 17 » 20	22	115	160	12	22	47	20	125	4,5
» 20 » 23	26	135	160	15	26	54	24	140	6,5
» 23 » 26	23	150	200	15	28	60	26	160	9,1
» 26 » 30	32	170	220	18	32	68	30	175	14,6
» 30 » 35	38	195	250	22	39	78	35	200	22
» 35 » 40	42	230	280	25	44	90	40	225	33,5

Примечания: 1. Материал корпуса — стальное литье марки 25Л-П, материал клина — сталь ВСт3кп2.

2. Основная ветвь каната должна располагаться на прямой линии клина

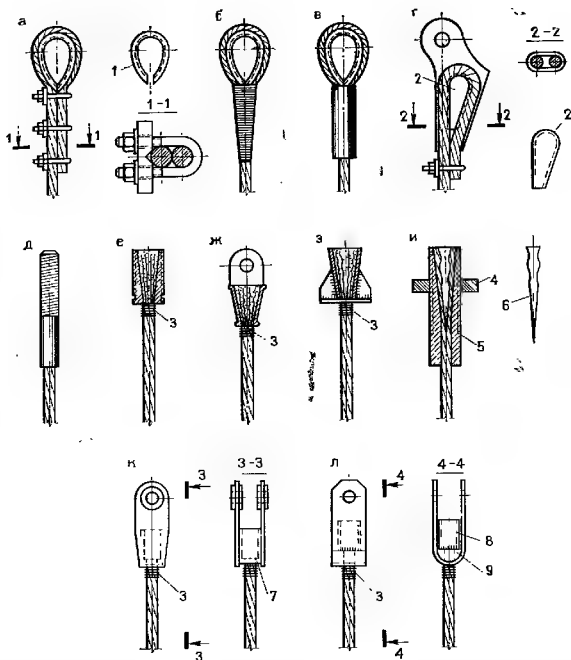


Рис. VII.3. Варианты концевых креплений вант из стальных канатов

а — петля с коушем на зажимах; б — петля с вплетенным коушем; в — петля с коушем и запрессовкой; г — самозаклинивающийся зажим; д — запрессованная втулка; е — заливной натяжной стакан; ж — заливной шарик; з — заливной упор; и — гильзоуклиновой анкер; к — заливной стакан со сварной скобой; л — то же, с гнутой; 1 — коуш; 2 — подвижный клин; 3 — мягкая вязальная проволока; 4 — опорная гайка; 5 — гильза из мягкой стали; 6 — фасонный клин; 7 — круглый или квадратный стакан; 8 — формообразующая труба; 9 — шайба

не повреждает канат. Крепление просто в изготовлении. Самозаклинивающийся зажим (рис. VII.3, г) обеспечивает закрепление конца ванты под действием усилия. Его размеры в зависимости от диаметра каната приведены в табл. VII.2. Самозаклинивающийся зажим позволяет компенсировать неточность в определении длины ванты и ускоряет монтаж.

При небольшом диаметре каната анкер выполняют путем запрессовки муфты, заканчивающейся резьбой (рис. VII.3, д). Длина муфты зависит от диаметра каната. Заливные анкерные крепления

канатов наиболее надежны. Стакан анкера может быть точечным литым, сварным, или другой конструкции (рис. VII.3, *е—з, к, л*) в зависимости от примыкания к опорному контуру. При передаче усилий от ванты на стальной контур через торец заливного стакана последний выполняют по схеме VII.3, *е*, при передаче усилий на железобетонный контур — по схеме рис. VII.3, *з*.

Размеры стакана определяют соотношениями по диаметру каната:

длина стакана	4,5—5 диам. каната
наружный диаметр стакана	3,5 » »
диаметр основания полости	2 » »

При шарнирном креплении ванты к опорному контуру стакан с двумя проушинами по схеме рис. VII.3, *ж* выполняют литым. Шарнирное примыкание вант обеспечивают и при использовании скоб, как показано на схемах рис. VII.3, *к, л*. Размеры сварных и гнутых скоб в зависимости от диаметра каната приведены в Руководстве [44]. Полость стакана с расплеченным концом каната заливают легкоплавким сплавом на основе цинка. Изготовление анкерных стаканов с заливкой их сплавами достаточно сложно, что является недостатком этого способа.

Литейные работы по закреплению концов канатов устраняются при применении гильзоклиновых анкеров. На рис. VII.3 и показана конструкция анкера с гильзой из мягкой стали и фасонного клина, который забивают вручную в расплеченный на пряди конец каната. Основные размеры гильзоклиновых анкеров даны в табл. VII.3. При закрытом канате расплеченный конец крепят с помощью наборов сегментных и штыревых клиньев.

Таблица VII.3. Гильзоклиновые анкера для стальных канатов

Диаметр каната, мм	Длина гильзы, мм	Диаметр гильзы, мм	Длина клина, мм	Диаметр торца клина, мм
19,5	135	28	105	20
22,5	150	32	115	22
25	170	35	130	25
27,5	175	38	135	26
31,5	215	44,5	165	32
36	230	50,5	175	34
38	255	54	195	36
42	280	59	215	42
45	300	63	230	45
52,5	350	80	320	62

Примечания: 1. Материал гильз — сталь ВСтЗсп5. 2. Материал клиньев — углеродистая сталь 45 и сталь 50 с последующей термообработкой.

Концевые крепления вант упрощаются при применении стержневой арматурной стали перфорированного профиля. Для вант с не большими усилиями анкер выполняют в виде простой петли диаметром 2,5 диаметра стержня (рис. VII.4, *а*). Такое крепление возможно при диаметрах стержней не более 16 мм.

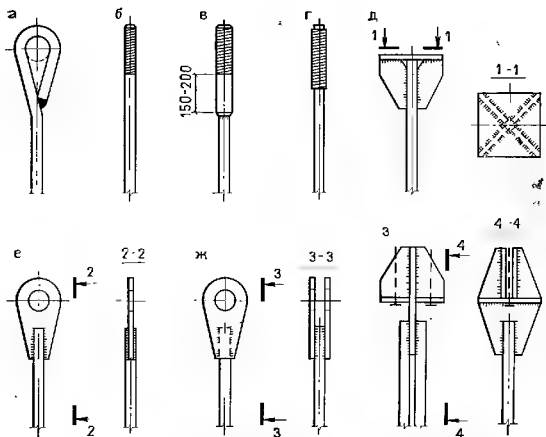


Рис. VII.4. Примеры концевых креплений вант из арматурных стержней: а — с петлей; б — с нарезкой; в — с хвостовиком; г — со стальной муфтой; д — с упорной шайбой; е — с одиночной фасонкой; ж — со спаренными фасонками; з — в виде сварного башмака с передачей усилия через стяжные высокопрочные болты

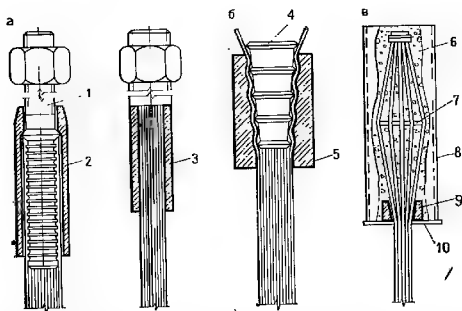


Рис. VII.5. Основные варианты концевых креплений вант из пучков высокопрочной проволоки

а — гидрозастерживаемые анкеры; б — анкер типа «колодка с пробкой»; в — анкер с заливкой бетоном; 1 — стержень из термостойкой стали; 2 — обжимная гильза из мягкой стали; 3 — то же, с наружной резьбой; 4 — пробка из термостойкой стали; 5 — колодка; 6 — мелкозернистый бетон марки М500 или М600; 7 — диафрагма-звездочка; 8 — бесшовная труба; 9 — стальное обжимное кольцо с коническим вкладышем; 10 — приваренное днище с отверстием

Нарезной конец стержня ослабляет сечение ванты (рис. VII.4,б), поэтому рекомендуется применять хвостовик большего диаметра (рис. VII.4,в). Хвостовик приваривают контактной или ванной электросваркой. Требуемый диаметр хвостовика принимают по прил. 4 после расчета на прочность по ослабленному сечению.

На конец ванта можно плотно насаживать муфту из обрезка трубы с резьбой (рис. VII.4,г). Муфту по торцам закрепляют сварными швами. Упорную шайбу с ребрами жесткости (рис. VII.4,д) применяют для анкеровки вант в монолитных бортовых элементах. Для шарнирного закрепления вант используют одиночные или спаренные фасонки со отверстиями (рис. VII.4,е, ж). Длину сварных швов для крепления фасонки определяют по расчету на прочность.

Для вант из пучков высокопрочной проволоки разработаны различные варианты анкерных креплений, наиболее характерные из которых приведены на рис. VII.5. Гильзостержневые анкеры (рис. VII.5,а) основаны на принципе запрессовки концов проволоки между гильзой из мягкой стали и закаленным стержнем. В этих анкерах обеспечивается только 75—85% прочности пучка. Положительными качествами анкерov являются сравнительно низкая стоимость и быстрота анкеровки на гидравлической установке.

Анкеры типа «колодка с пробкой» известны различных модификаций. Надежная анкеровка проволок обеспечивается за счет заклинивания их между мягкой колодкой и пробкой из закаленной стали (рис. VII.5,б). При анкерах этого типа пучки могут иметь любое нужное число проволок. Натяжение пучков и запрессовку концов проволок производят гидравлическим домкратом двойного действия. Для мощных вант из пучков высокопрочной проволоки рекомендуются анкеры в виде стакана из трубы с заливкой отогнутых концов проволоки высокопрочным мелкозернистым бетоном (рис. VII.5,в). Натяжение вант производят с помощью захватов, насаживаемых на стакан снизу аналогично скобам на рис. VII.3,к,л.

Глава VIII. Основы расчета вантовых и мембранных покрытий

§ VIII.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Расчеты вантовых систем с достаточно точным вычислением усилий в нитях являются сложными и трудоемкими. Обусловлено это прежде всего нелинейной зависимостью усилий в вантах от нагрузки. В настоящем пособии даются основные сведения по упрощенным приемам статического расчета различных систем вантовых покрытий, что позволяет архитекторам по значению и характеру усилий произвести предварительную конструктивную проработку любого покрытия в целом.

Висячие покрытия рассчитывают по предельным состояниям

в соответствии с действующими нормами проектирования строительных конструкций. По предельному состоянию первой группы рассчитывают несущую способность конструкций сооружения, по предельному состоянию второй группы определяют деформативность вант, влияющую на пригодность покрытия к нормальной эксплуатации. Расчет несущей способности обязателен для всех конструктивных элементов и напряженных соединений покрытия.

Деформативность висячих покрытий рассчитывают на стадии точного инженерного проектирования. В реальных расчетах искривления и прогибы вант проверяют как при максимальных равномерно распределенных нагрузках, так и в воздействии несимметричных нагрузок и ветрового отсоса. Архитектор может ограничиться эмпирическими приемами обеспечения жесткости покрытия, поскольку в таком случае точный расчет не вносит существенных изменений в архитектурный замысел сооружения. На стадии эскизной проработки покрытия прогибы вант архитектор иногда проверяет для висячих оболочек и струнных конструкций, как вызывающих наибольшие опасения по деформативности при действии только максимальных равномерно распределенных нагрузок.

Точный расчет мембран производят путем решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, выражающих неразрывность деформаций и равновесие оболочки, с одновременным учетом податливости опорного контура. Для стадии ориентировочного расчета покрытия можно определять напряженное состояние мембранной оболочки упрощенным способом.

§ VIII.2 УСИЛИЯ В ВИСЯЧИХ ОБОЛОЧКАХ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВАНТАМИ

За расчетную схему ванты в зависимости от конструктивной компоновки покрытия принимают провисающую нить с опорами, расположенными на одном или разных уровнях (рис. VIII.1). Нагрузка от массы кровли и снега распределяется равномерно вдоль ванты.

Распор ванты без учета ее деформации от растяжения вычисляют по формуле

$$H = M_0/y = q l^2 / (8f), \quad (\text{VIII.1})$$

где M_0 — изгибающий момент от нагрузки q в обычной балке пролетом l ; y — ордината линии ванты.

Вертикальная составляющая опорной реакции ванты при закреплении концов на одном уровне:

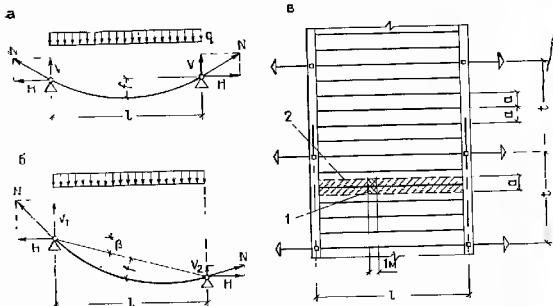
$$V = q l / 2. \quad (\text{VIII.2})$$

Наибольшее усилие растяжения действует в ванте у опоры:

$$N = \sqrt{H^2 + V^2} = H \sqrt{1 + 16f^2/l^2}. \quad (\text{VIII.3})$$

Наименьшее растягивающее усилие ванта испытывает посередине пролета:

$$N_{\min} = H.$$



Фиг. VIII.1. Расчетная схема параллельно расположенных вант в висячей оболочке
 а — с опорами в одном уровне; б — с опорами на разных уровнях; в — план покрытия; 1 — площадка действия линейной нагрузки q ; 2 — грузовая полоса ванты

По относительному значению стрелы провисания ванты, используя формулу (VIII.3), легко вычислить неравномерность распределения усилия по длине ванты:

$$\text{при } f = 1/10 \quad l \quad N/N_{\min} = 1,077;$$

$$\text{при } f = 1/25 \quad l \quad N/N_{\min} = 1,0127,$$

из чего следует вывод, что при стреле провисания ванты в обычных пределах ($1/10$ — $1/25$) l неравномерность использования несущей способности ванты с постоянным сечением составляет 1—8%.

При опорах на разных уровнях ванта с наибольшим усилием растягивается в точке закрепления к верхнему бортовому элементу, так как вертикальные составляющие ее концов не равны между собой:

$$V_1 = q l/2 + H \operatorname{tg} \beta; \quad V_2 = q l/2 - H \operatorname{tg} \beta. \quad (\text{VIII.4})$$

С учетом упругого удлинения ванты под действием нагрузки значение распора может быть вычислено по уравнению, известному из учебного пособия [33, с. 148]:

$$H^3 + 8B H^2 / (3n^2 \mu^3) = C B / (2l \mu^3), \quad (\text{VIII.5})$$

где $B = EA$; $n = l/f$; $\mu = S/l$; $C = q^2 l^3 / 12$; A — площадь поперечного сечения ванты; E — модуль упругости материала ванты; S — длина ванты (по дуге).

Уравнение (VIII.5) дает достаточно точное значение распора с учетом растяжимости ванты, однако решение его весьма трудоемко, поэтому ниже доказывается возможность использования упрощенного расчета с использованием формулы (VIII.1).

Принимая длину ванты при равномерно распределенной нагрузке равной

$$S = l + 8f^2 / (3l), \quad (\text{VIII.6})$$

можно получить следующее сопоставление результатов вычисления приближенного значения распора H_1 по формуле (VIII.1) с более точным значением H_2 по формуле (VIII.5) для отдельных конкретных условий;

$H_2/H_1=0,924$ — ванта из стального каната и $f=1/10l$;

$H_2/H_1=0,978$ — ванта из стержневой арматуры и $f=1/10l$;

$H_2/H_1=0,794$ — ванта из стального каната и $f=1/20l$;

$H_2/H_1=0,872$ — ванта из стержневой арматуры и $f=1/20l$.

Пренебрежение упругими деформациями ванты приводит к несколько завышенному значению распора, что идет в запас прочности покрытия. Погрешность расчетов по формуле (VIII.1) практически невелика, она находится в пределах от 2,2—7,6% при $f=1/10l$ и до 12,8—20,6% при $f=1/20l$.

Растягивающее усилие в вантах следует определять по расчетной нагрузке в стадии возведения покрытия. Значение этой нагрузки, с учетом дополнительного растяжения вант, необходимого для предварительного напряжения покрытия, подсчитывают так:

$$q = [g_n + (g_{кр} + p_{сн}) (1,2 - 1,3)] a, \quad (\text{VIII.7})$$

где g_n — расчетная нагрузка от массы 1 м² плит; $g_{кр}$ — расчетная нагрузка от массы 1 м² кровли; $p_{сн}$ — расчетная снеговая нагрузка от 1 м² покрытия; a — шаг вант в покрытии.

Прогиб ванты при равномерно распределенной нагрузке составляет (вывод см. [36], с. 39—42):

$$\Delta f = \frac{3}{128} \frac{\mu^2}{f^2} \frac{q l^4}{EA}, \quad (\text{VIII.8})$$

где $\mu = 1 + 8f^2/(3l^2)$ — отношение длины ванты к пролету.

Первоначальная длина ванты, т. е. длина «в заготовке», при опорах на одном уровне может быть вычислена по формуле

$$S = l [1 + 8f^2/(3l^2) - H/(EA)], \quad (\text{VIII.9})$$

При опорах на разных уровнях первоначальная длина ванты составляет (вывод см. [17], с. 21—23):

$$S = l [1/\cos \beta + 8f^2 \cos^3 \beta / (3l^2) - H/(EA \cos^2 \beta)], \quad (\text{VIII.10})$$

где β — угол наклона к горизонту линии, соединяющей опоры ванты.

Усилие в наклонных оттяжках (см. рис. VII.1, б) вычисляют по формуле

$$N_{от} = H t / (a \cos \alpha), \quad (\text{VIII.11})$$

где α — угол наклона оттяжки к горизонту; t — шаг оттяжек вдоль здания.

Усилие в вертикальных оттяжках, согласно расчетной схеме на рис. VII.1, в, определяют по формуле

$$N_{от} = N t h_1 / (a h_2) - H t h_1' / (a h_2), \quad (\text{VIII.12})$$

где h_2 — плечо усилия в оттяжке относительно центра подошвы фундамента стойки; $h_1' = h - 4h_2/l$ — расстояние по вертикали от линии действия N до центра подошвы фундамента стойки; h — вертикальная проекция стойки.

Усилия в висячих оболочках с радиальными вантами зависят от конструктивной формы покрытия. Расчетные схемы основных типов радиальных покрытий приведены на рис. VIII.2, VIII.3. Нагрузка на 1 м ванта у наружного кольца q является наибольшей для стадии возведения покрытия и определяется по формуле (VIII.7).

Расчет распора в радиальных покрытиях предлагается производить без учета упругих деформаций вант по аналогии с покрытиями при параллельных вантах. В этом случае вычисление распора значительно упрощается, а некоторые завышенные его значения уходят в запас прочности покрытия.

Вогнутое покрытие. Растягивающее усилие в ванте у наружного опорного кольца вычисляют по формулам:

$$H = q l^2 / (24f); \quad V = q l / 4;$$

$$N = \sqrt{H^2 + V^2} = H \sqrt{1 + 36f^2 / l^2}. \quad (\text{VIII.13})$$

Неравномерность растягивающего усилия по длине ванта зависит от стрелы провисания и составляет:

$$\text{при } f = \frac{1}{10}l \quad N/H = 1,166, \text{ т. е. } 16,6\%;$$

$$\text{при } f = \frac{1}{20}l \quad N/H = 1,044, \text{ т. е. } 4,4\%;$$

из чего следует вывод, что с уменьшением стрелы провисания достигается более полное использование сечения ванта вдоль пролета.

Усилие, растягивающее центральное кольцо и сжимающее наружное:

$$N_k = H l / (2a). \quad (\text{VIII.14})$$

Прогиб вант в центре покрытия составляет (согласно [36], с. 39—42):

$$\Delta f = \frac{5}{864} \frac{\mu^2}{f^2} \frac{q l^4}{EA}, \quad (\text{VIII.15})$$

где $\mu = 1 + 18f^2 / (5l^2)$ — отношение длины ванта к пролету.

Длину ванты «в заготовке» определяют по формуле

$$S = l [1 + 18f^2 / (5l^2) - H / (EA)]. \quad (\text{VIII.16})$$

Шатровое покрытие. Распор ванты вычисляют по формуле

$$H = q l^2 / (16f). \quad (\text{VIII.17})$$

Вертикальная составляющая концов ванты зависит от угла наклона к горизонту линии, соединяющей опоры ванты;

$$V_n = q l / 6 + H \operatorname{tg} \beta; \quad V_n = q l / 3 - H \operatorname{tg} \beta. \quad (\text{VIII.18})$$

При соотношении геометрических параметров покрытия $f/l = 3 \operatorname{tg} \beta / 16$ ванты коснутся горизонтальной плоскости в месте примыкания к наружному кольцу и вся нагрузка от покрытия будет передаваться на центральную стойку. Более крутой перепад опор вант по высоте, чем $\operatorname{tg} \beta = 16f / (3l)$, назначать не рекомендуется, поскольку опорное кольцо будет отрываться от поддерживающих колонн.

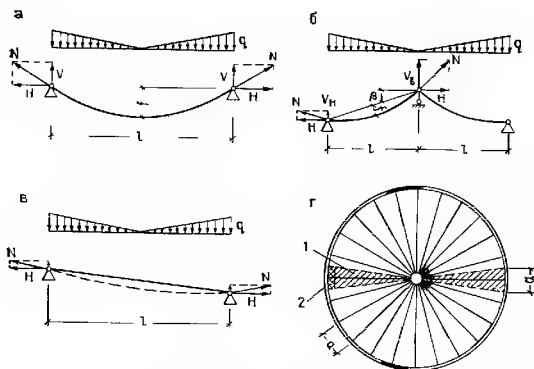


Рис. VIII.2. Расчетная схема вант однослойного радиального покрытия

a — вогнутого; *б* — шатрового; *в* — спирального; *г* — план покрытия; 1 — грузовая площадь ванты; 2 — площадка действия линейной нагрузки

Наибольшее растягивающее усилие в ванте N возникает у одного из концов:

$$\left. \begin{aligned} N &= \sqrt{H^2 + V_B^2} = H \sqrt{1 + [8f/(3l) + \operatorname{tg} \beta]^2}; \\ N &= \sqrt{H^2 + V_B^2} = H \sqrt{1 + [16f/(3l) - \operatorname{tg} \beta]^2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{VIII.19})$$

Усилие, растягивающее центральное кольцо и сжимающее наружное, вычисляют по формуле

$$N_k = H l / a. \quad (\text{VIII.20})$$

Первоначальную длину ванты определяют (согласно [17], с. 20) по формуле

$$S = l [1/\cos \beta + 128f^2 \cos^3 \beta / (45l^3) - H / (EA \cos^2 \beta)]. \quad (\text{VIII.21})$$

При расчете многопролетного шатрового покрытия нужно вычислять усилия в вантах каждого пролета. В центральном пролете усилия определяют по формулам (VIII.17), (VIII.18), (VIII.19) с использованием значений f_1 , l_1 , $\operatorname{tg} \beta_1$ (рис. VIII.3).

Распор ванты крайнего пролета составляет:

$$H_2 = q_1 l_2^2 / (8f_2) + (q_2 - q_1) l_2^2 / (16f_2). \quad (\text{VIII.22})$$

где q_2 — нагрузка на 1 м ванты у наружного опорного кольца; ее значение вычисляют по формуле (VIII.7) при шаге вант по наружному кольцу a_2 .

Для определения максимального растягивающего усилия в ванте крайнего пролета нужно знать вертикальные составляющие концов ванты V'_2 и V'_2 . Эти составляющие зависят от взаимного

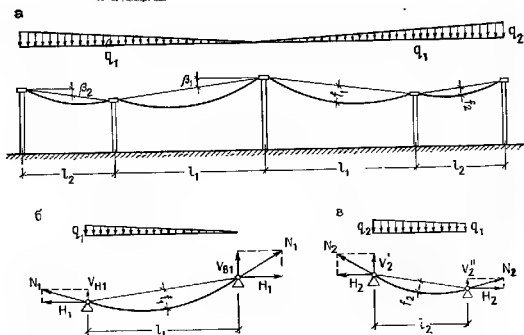


Рис. VIII.3. Расчетная схема многопролетного шатрового покрытия
 а — поперечный разрез покрытия; б — расчетная схема ванта среднего пролета; в — то же, крайнего

расположения по высоте наружного и промежуточного опорных контуров. Если промежуточное кольцо ниже наружного, то:

$$\left. \begin{aligned} V_2' &= q_1 l_2/2 + (q_2 - q_1) l_2/3 + H \operatorname{tg} \beta; \\ V_2'' &= q_1 l_2/2 + (q_2 - q_1) l_2/6 - H \operatorname{tg} \beta; \end{aligned} \right\} \quad \text{[(VIII.23)]}$$

если промежуточное кольцо выше наружного, то:

$$\left. \begin{aligned} V_2' &= q_1 l_2/2 + (q_2 - q_1) l_2/3 - H \operatorname{tg} \beta; \\ V_2'' &= q_1 l_2/2 + (q_2 - q_1) l_2/6 + H \operatorname{tg} \beta; \end{aligned} \right\} \quad \text{(VIII.24)}$$

Центральное кольцо растягивается усилием

$$N_{\text{ц.к}} = H_1 l_1/a_1. \quad \text{(VIII.25)}$$

В промежуточном опорном кольце возникает усилие

$$N_{\text{п.к}} = (H_1 - H_2) l_1/a_1, \quad \text{(VIII.26)}$$

которое будет сжиматься, если $H_1 > H_2$.

Наружное опорное кольцо сжимается усилием

$$N_{\text{н.к}} = H_2 (l_1 + l_2)/a_2. \quad \text{(VIII.27)}$$

Длину ванта в заготовке для центрального пролета вычисляют по формуле (VIII.21). В крайнем пролете ванта имеет длину:

$$S_2 = l_2 \left[\frac{1}{\cos \beta_2} + \frac{4(q_1^2 + q_2^2) + 7q_1 q_2}{360 H_2^2} l_2^2 \cos^3 \beta_2 - \frac{H_2}{E A \cos^3 \beta_2} \right]. \quad \text{(VIII.28)}$$

Спиральное покрытие. В спиральном покрытии ванта воспринимают нагрузку как струны, поэтому распор их можно опреде-

лять по уравнению, приведенному в [33], которое после несложных преобразований упрощается и принимает вид:

$$H^2 - H N_n = E q^2 l^2 / (160 R_y), \quad (\text{VIII.29})$$

где N_n — усилие предварительного натяжения ванты, его значением нужно задаваться; R_y — расчетное сопротивление материала ванты; для стальных канатов $R_y = 0,625 \sigma_b$.

Если ванты предварительно не натягивать, то распор вычисляют по простой формуле, вытекающей из уравнения (VIII.29):

$$H = (q l / 4) \sqrt{E / 160 R_y}. \quad (\text{VIII.30})$$

Усилие, растягивающее центральное кольцо и сжимающее наружное кольцо, составляет при $N_n = 0$

$$N_k = (H + N_n) l / (2a) \text{ или } N_k = H l / (2a). \quad (\text{VIII.31})$$

Длина ванты «в заготовке»: $S = l$.

§ VIII.4. УСИЛИЯ В ДВУХПОЯСНЫХ ПОКРЫТИЯХ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВАНТАМИ

При расчете покрытия рассматривают одну вантовую ферму, на которую действует равномерно распределенная нагрузка. Взаимное расположение несущей и стабилизирующей вант, а также конструктивные элементы между ними (см. рис. III.1) не влияют на определение распора. Распределение усилий в вантах показано на расчетной схеме (рис. VIII. 4).

Расчетную нагрузку на вантовую ферму подсчитывают следующим образом:

$$q = q_0 a, \quad (\text{VIII.32})$$

где q_0 — расчетная нагрузка на 1 м² массы покрытия и снега; a — шаг вант вдоль здания.

При действии на покрытие расчетной нагрузки усилие предварительного натяжения стабилизирующих вант не должно погашаться, как показано на рис. VIII.4,б. Для обеспечения жесткости покрытия в стадии эксплуатации в стабилизирующих вантах нужно оставлять 20—30 % начального натяжения, из чего следует, что

$$\Delta p = (0,2 - 0,3) p_0. \quad (\text{VIII.33})$$

Погащение предварительного напряжения стабилизирующей ванты, согласно выводам в учебном пособии [33], происходит при выполнении следующего условия:

$$p_0 = q [\alpha f_c / (\alpha f_c + f_n)], \quad (\text{VIII.34})$$

где α — коэффициент пропорциональности изменения распоров несущей и стабилизирующей вант при действии внешней нагрузки (в качестве первого приближения его значение можно принимать 0,1—0,15).

Усилия в несущей ванте максимального значения достигают в стадии эксплуатации. По длине ванты наибольшее растягивающее усилие действует у ее концов:

$$H_n = \frac{(q + \Delta p) l^2}{8 f_n}; \quad V_n = \frac{(q + \Delta p) l}{2}; \quad N_n = \sqrt{H_n^2 + V_n^2}. \quad (\text{VIII.35})$$

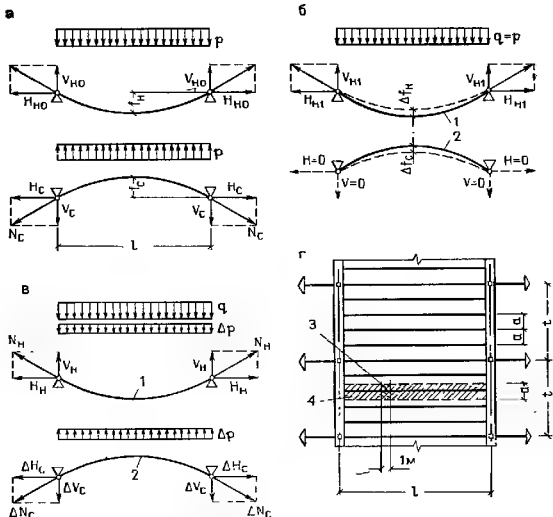


Рис. VIII.4. Расчетные схемы параллельно расположенных вант в двухъярусном покрытии: а — стадия предварительного напряжения; б — стадия погашения внешней нагрузкой предварительного напряжения покрытия; в — расчетная схема вант в стадии эксплуатации; г — план покрытия; 1 — несущая ванта; 2 — стабилизирующая ванта; 3 — площадка действия линейных нагрузок q , p , Δp ; 4 — грузовая площадь на вантовую ферму

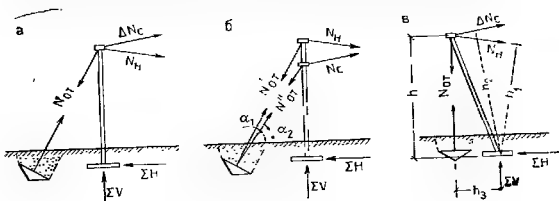


Рис. VIII.5. Расчетные схемы оттяжек в двухъярусных покрытиях с параллельными вантами: а — при одном бортовом элементе; б — то же, при двух; в — при наклонной стойке

Стабилизирующая ванта испытывает наибольшее усилие в стадии возведения покрытия:

$$H_c = \frac{(p_0 + \Delta p) l^3}{8 f_c}; \quad V_c = \frac{(p_0 + \Delta p) l}{2}; \quad N_c = \sqrt{H_c^2 + V_c^2}. \quad (\text{VIII.36})$$

Длина несущей и стабилизирующей вант «в заготовке» составляет:

$$S_n = l \left[1 + \frac{8f_n^2}{3l^2} - \frac{H_n}{E_n A_n} \right]; \quad S_c = l \left[1 + \frac{8f_c^2}{3l^2} - \frac{H_c}{E_c A_c} \right]. \quad (\text{VIII.37})$$

В распорках между вантами в выпуклом покрытии (рис. III.1, а, г) наибольшие сжимающие усилия возникают в стадии эксплуатации, поскольку через распорки внешняя нагрузка передается на несущие ванты:

$$N_p = (q + \Delta p) a_1, \quad (\text{VIII.38})$$

где a_1 — шаг распорок в вантовой ферме.

В вертикальных растяжках вогнутого покрытия (рис. III.1, б) максимальные усилия действуют в стадии монтажа, так как после загрузки покрытия натяжение стабилизирующих вант ослабевают:

$$N_p = (p_0 + \Delta p) a_1. \quad (\text{VIII.39})$$

В наклонных растяжках между вантами (рис. III.1, в) усилия в первом приближении вычислять по формуле

$$N_p = (p_0 + \Delta p) a_1 / \cos \varphi, \quad (\text{VIII.40})$$

где φ — угол наклона раскосов к вертикали.

Усилие в оттяжках зависит от конструктивного решения опорного контура. На рис. VIII.5 приведены расчетные схемы основных вариантов опорных конструкций с оттяжками.

В односторонней наклонной оттяжке возникает усилие:

$$N_{от} = (H_n + \Delta H_c) t / (a \cos \alpha), \quad (\text{VIII.41})$$

где t — шаг оттяжек вдоль здания; α — угол наклона оттяжки к горизонту; $\Delta H_c = \Delta p l^2 / (8f_c)$ — остающийся распор стабилизирующей ванты при расчетной нагрузке на покрытие.

При двусторонних бортовых элементах усилия в оттяжках вычисляются по формуле (VIII.11) с использованием соответствующих значений: H_n , H_c , a_1 , a_2 .

В вертикальной оттяжке действует усилие:

$$N_{от} = (N_n h_1 + \Delta N_c h_2) t / (a h_3) = (H_n h_1' + \Delta H_c h_2') t / (a h_3). \quad (\text{VIII.42})$$

где h_3 — плечо усилия в оттяжке относительно центра подошвы фундамента стойки; $h_1' = h - 4h_3 f_n / l$ — расстояние по вертикали от линии действия N_n до центра подошвы фундамента стойки; $h_2' = h + 4h_3 f_c / l$ — то же, но от линии действия усилия N_c ; h — вертикальная проекция стойки.

§ VIII.5. УСИЛИЯ В ДВУХПОЯСНЫХ ПОКРЫТИЯХ С РАДИАЛЬНЫМИ ВАНТАМИ

Расчетная схема вант не зависит от взаимного расположения их в покрытии. Поскольку все радиальные вантовые фермы пересекаются в центре покрытия, линейная нагрузка на ванты распределяется по закону двух треугольников (рис. VIII.6). Расчетную

нагрузку на 1 м несущей ванта у наружного кольца вычисляют по формуле (VIII. 32).

Как и в покрытиях с параллельными вантами, в радиальных системах для обеспечения их жесткости при полином сочетании нагрузок должно оставаться некоторое усилие растяжения в стабилизирующих вантах (20—30 % начального). По этой причине нагрузку p_0 для предварительного напряжения покрытия следует завышать на Δp . Значения нагрузок Δp и p_0 определяют по формулам (VIII. 33) и (VIII. 34).

Усилия в несущей ванте достигают наибольшего значения у наружного кольца в стадии эксплуатации покрытия:

$$H_n = \frac{(q + \Delta p) l^2}{24 f_n}; \quad V_n = \frac{(q + \Delta p) l}{4}; \quad N_n = \sqrt{H_n^2 + V_n^2}. \quad (\text{VIII.43})$$

Стабилизирующие ванты рассчитывают в стадии монтажа, когда в них действует максимальное растягивающее усилие:

$$H_c = \frac{(p_0 + \Delta p) l^2}{24 f_c}; \quad V_c = \frac{(p_0 + \Delta p) l}{4}; \quad N_c = \sqrt{H_c^2 + V_c^2}. \quad (\text{VIII.44})$$

В кольцах центрального барабана от распора несущих и стабилизирующих вант возникают растягивающие усилия. С такими же по значению усилиями сжимаются раздвоенные кольца опорного контура (рис. III. 5, б, е):

$$N_{к.н} = H_n l / (2a); \quad N_{к.с} = H_c l / (2a). \quad (\text{VIII.45})$$

В вогнутом покрытии (рис. III.5, е) центральное кольцо растягивается совместным действием несущих и стабилизирующих вант. Наружное опорное кольцо в покрытиях (на рис. III. 5, а, в, г) испытывает такое же по значению сжимающее усилие:

$$N_k = (H_n + \Delta H_c) l / (2a), \quad (\text{VIII.46})$$

где $\Delta H_c = \Delta p l^2 / (24 f_c)$ — остающийся распор стабилизирующих вант при действии на покрытие расчетной нагрузки.

В распорках и растяжках между вантами (рис. III. 5, а, б, г, е) наибольшие усилия действуют вблизи опорного контура. Значения этих усилий рассчитывают по формулам (VIII.38), (VIII.39) и (VIII.40).

Длину несущей и стабилизирующей вант «в заготовке» вычисляют по формулам:

$$S_n = l \left(1 + \frac{18 f_n^2}{5 l^2} - \frac{H_n}{E_n A_n} \right); \quad S_c = l \left(1 + \frac{18 f_c^2}{5 l^2} - \frac{H_c}{E_c A_c} \right). \quad (\text{VIII.47})$$

В покрытии типа «велосипедное колесо» (рис. III.5, в) стабилизирующие ванты работают как струны, вследствие чего расчетная схема всей системы представляется такой (рис. VIII.7).

Усилие предварительного натяжения стабилизирующих вант погасится при действии на покрытие расчетной нагрузки, если кольца барабана раздвинуты с усилием ΣP_0 :

$$\Sigma P_0 = \Sigma P_q [\alpha f_c / (\alpha f_c + f_n)]. \quad (\text{VIII.48})$$

где α — имеет то же значение, что и в формуле (VIII.34).

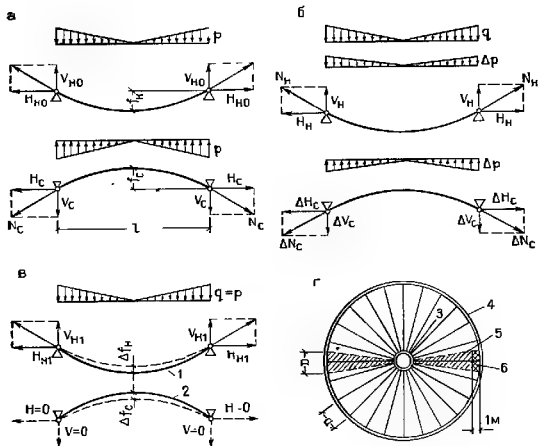


Рис. VIII.6. Расчетные схемы вант в двуххоном радиальном покрытии

а — стадия предварительного напряжения; б — расчетная схема в стадии эксплуатации; в — стадия погашения внешней нагрузкой предварительного напряжения покрытия; г — план покрытия; 1 — несущая вант; 2 — стабилизирующая вант; 3 — центральное кольцо; 4 — наружное опорное кольцо; 5 — грузовая площадь действия нагрузок на вантовую ферму; 6 — площадка действия линейных нагрузок q , p , Δp

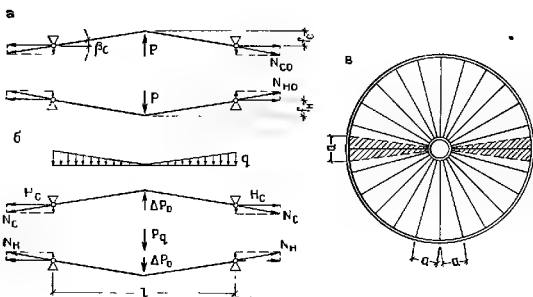


Рис. VIII.7. Расчетная схема вант в двуххоном покрытии типа «велосипедное колесо»

а — стадия напряжения вант при возведении покрытия; б — расчетная схема вант в стадии эксплуатации; в — план покрытия

Для обеспечения жесткости покрытия при полном сочетании нагрузок каждую пару вант нужно раздвигать с усилием:

$$P = P_0 + \Delta P = (1,2 - 1,3) P_0. \quad (\text{VIII.49})$$

тогда в стабилизирующих вантах будет оставаться 20—30 % начального натяжения.

При внешней нагрузке, которая вдоль пары вант распределяется по закону двух треугольников, через барабан на несущую ванту передается следующее сосредоточенное усилие:

$$P_q = 2 q l / 6 = q l / 3. \quad (\text{VIII.50})$$

На барабан в целом передается усилие:

$$\Sigma P_q = n P_q, \quad (\text{VIII.51})$$

где n — число взаимно пересекающихся вантовых пар в покрытии.

Несущая ванта растягивается по длине с постоянным усилием, значение которого является максимальным в стадии эксплуатации покрытия:

$$N_v = ((P_q + \Delta P) / 2) \sqrt{1 + l^2 / (4 f_v^2)}. \quad (\text{VIII.52})$$

Распор стабилизирующей ванты и растягивающее усилие в ней имеют наибольшие значения в стадии эксплуатации. Их вычисляют по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} H_c &= N_c \cos \beta_c - \frac{N_c}{\sqrt{1 + 4 f_c^2 / l^2}}; \\ N_c &= N_{c.p} + H_q; \\ H_q^3 - H_q^2 N_{c.p} &= \frac{E_c q^2 l^3 (H_q + N_{c.p})}{720 R_y} \end{aligned} \right\} \quad (\text{VIII.53})$$

где $N_{c.p} = (\Delta P / 2) \sqrt{1 + l^2 / (4 f_c^2)}$ — оставшаяся часть усилия начального натяжения.

Кубическое уравнение решается методом пробных попыток. При первой попытке можно принимать, что усилие $N_{c.p}$ не влияет на площадь сечения стабилизирующей ванты, тогда

$$H_q^2 - H_q N_{c.p} = E_c q^2 l^3 / (720 R_y),$$

где R_y — расчетное сопротивление материала ванты (для стальных канатов $R_y = 0,625 \sigma_n$).

Усилия в кольцах центрального барабана определяют по формулам (VIII.45), в наружном опорном кольце — по формуле (VIII.46).

§ VIII.6. УСИЛИЯ В ПОКРЫТИЯХ С ВАНТОВЫМИ СЕТЯМИ

Покрытия с вантовыми сетями — сложные пространственные системы, поэтому для приближенного расчета их воспользуемся следующими допущениями:

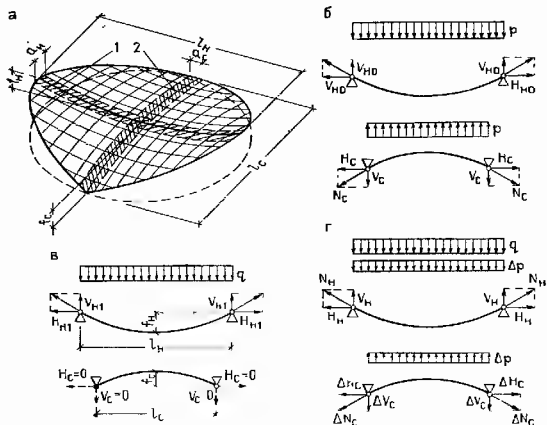


Рис. VIII.8. Расчетная схема ортогональной вантовой сети

a — выделение вант из покрытия для расчета; *б* — расчетная схема вант в стадии предварительного натяжения покрытия; *в* — стадия погашения предварительного натяжения стабилизирующих вант; *г* — расчетная схема вант в стадии эксплуатации покрытия; 1 — основная несущая ванта; 2 — основная стабилизирующая ванта

1. Все ванты имеют одинаковый параметр l^2/f ; в этом случае при равномерно распределенной нагрузке распоры всех несущих вант одинаковы, одинаковы и распоры стабилизирующих вант.

2. Влиянием прогиба вант под нагрузкой пренебрегаем, т. е. не учитываем изменение расчетной схемы вант после их упругих деформаций.

3. Любой опорный контур считаем жестким.

Вследствие равенства распора все стабилизирующие ванты работают одинаково и передают одинаковое давление на несущие ванты; все несущие ванты по работе также не отличаются одна от другой. Для расчета достаточно выделить из покрытия любую несущую и любую стабилизирующую ванту, однако удобнее рассчитывать ванты вдоль главных осей покрытия (рис. VIII.8, *a*), поскольку его основные геометрические параметры уже назначены при компоновке сооружения в целом.

Расчетная нагрузка на несущую ванту q подсчитывается по формуле (VIII.32). Нагрузка на стабилизирующую ванту p является условной (ванта натягивается с одного конца механическим способом, действие нагрузки p при расчете покрытия эквивалентно этому натяжению).

Согласно [33], предварительное натяжение стабилизирующей

ванты погасятся, как показано на рис. VIII.8, в при выполнении условия:

$$p_0 = q [\alpha f_c / (\alpha f_c + f_n l_c^2 / l_n^2)] (a_c / a_n), \quad (\text{VIII.54})$$

где p_0 — линейная нагрузка для предварительного натяжения стабилизирующей ваны; α — коэффициент пропорциональности изменения распоров вант (в качестве первого приближения можно принимать $\alpha = 0,3-0,5$); l_n ; f_n — длина и стрела провисания главной несущей ваны; l_c ; f_c — длина и стрела подъема главной стабилизирующей ваны; a_n ; a_c — шаг несущих и стабилизирующих вант.

Для обеспечения жесткости покрытия при действии расчетной нагрузки необходимо стабилизирующие ваны натягивать с учетом условия (VIII.33). Усилия в несущей и стабилизирующей вантах следует определять по формулам (VIII.35) и (VIII.36), а первоначальные длины всех несущих и стабилизирующих вант рассчитываются по выражению (VIII.37).

На трос-подбор (см. рис. IV.9, IV.17) от стабилизирующих вант передается распор, который является максимальным в стадии монтажа вантовой сети покрытия. Заменяя сосредоточенные силы от стабилизирующих вант равномерно распределенной нагрузкой, можно вычислить усилия в тросе-подборе:

$$H_{\text{т-п}} = \frac{H_c l_{\text{т-п}}^2}{8 a_c f_{\text{т-п}}}; \quad V_{\text{т-п}} = \frac{H_c l_{\text{т-п}}}{2 a_c}; \quad N_{\text{т-п}} = \sqrt{H_{\text{т-п}}^2 + V_{\text{т-п}}^2}, \quad (\text{VIII.55})$$

где $N_{\text{т-п}}$ — усилие растяжения в точках закрепления троса-подбора к жестким частям опорного контура; $l_{\text{т-п}}$; $f_{\text{т-п}}$ — пролет и стрела провисания троса-подбора.

Первоначальная длина троса-подбора составляет:

$$S_{\text{т-п}} = l_{\text{т-п}} [1 + 8 f_{\text{т-п}}^2 / (3 l_{\text{т-п}}^2) - H_{\text{т-п}} / (E_{\text{т-п}} A_{\text{т-п}})]. \quad (\text{VIII.56})$$

§ VIII.7. ПОДБОР СЕЧЕНИЙ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВИСЯЧИХ ОБОЛОЧЕК И ВАНТОВЫХ ПОКРЫТИЙ

После определения усилий в покрытии производят подбор сечений несущих элементов и рассчитывают на прочность узлы крепления вант к опорным конструкциям. При назначении сечений вант предлагается пользоваться сортаментом стальных канатов и стержневой арматуры, приведенным в прил. 12, 13.

Требуемая площадь сечения ваны из стержневой арматуры:

$$A \geq N / (R_y \cdot 100), \quad (\text{VIII.57})$$

где N — расчетное усилие в ванте, Н; R_y — расчетное сопротивление арматурной стали растяжению ($R_y = 340$ МПа — для стали класса А-III и $R_y = 500$ МПа — для класса А-IV); 100 — коэффициент перехода от МПа Н/см².

Требуемая площадь ваны и троса-подбора из стального каната:

$$A \geq 1,6 N / (k_n R_{un} \cdot 100), \quad (\text{VIII.58})$$

где 1,6 — коэффициент надежности по материалу; k_n — коэффициент, учитывающий понижение разрывного усилия каната по отношению к суммарному разрывному усилию проволок ($k_n = 0,81-0,85$ — для канатов ТК конструкции

1X37 и ЛК-Р конструкции 6X19; $k_n=0,75-0,80$ — для канатов ТЛК-РО конструкции 6X36; $k_n=1$ — для закрытых несущих канатов); R_{un} — временное сопротивление проволок каната разрыву ($R_{un}=1176, 1372, 1568, 1666, 1764, 1862$ и 1960 МПа — для канатов ТК, ТЛК-РО, ЛК-Р; $R_{un}=1078, 1176, 1274$ и 1372 МПа — для закрытых канатов); 100 — коэффициент перехода от МПа к Н/см².

Требуемую площадь сечения ванты из пучка высокопрочной проволоки определяют по формуле (VIII.57) с подстановкой расчетного сопротивления R_{dh} , равного 1010, 950 и 900 МПа соответственно для проволоки диаметром 4, 5 и 6 мм.

Центральные кольца в радиальных покрытиях испытывают осевое растягивающее усилие N_k . Требуемую площадь сечения кольца определяют по формуле (VIII.57) с использованием расчетного сопротивления прокатной стали по прил. 1.

Опорные кольца в радиальных покрытиях работают на сжатие, поэтому кроме расчета на прочность их следует проверять на устойчивость в своей плоскости. Критическое сжимающее усилие в кольце с учетом влияния вант может быть определено по формуле, приведенной в [9]:

$$N_{кр} = (2 E_k J_k \cdot 100/r^2) [1 + \sqrt{1 + c r^2 / (E_k J_k \cdot 100)}], \quad (\text{VIII.59})$$

где r — радиус оси кольца; $E_k J_k$ — жесткость кольца на изгиб в собственной плоскости, МПа·см⁴ (для железобетонного кольца с прямоугольным поперечным сечением можно принимать $E_k J_k = 0,85 E_c b h^3 / 12$); $c = N_k / [\epsilon + \frac{\mu^2 - 1}{\cos^2 \beta}]$ — коэффициент, характеризующий работу упругого основания, II; N_k — усилие, сжимающее кольцо, Н; $\epsilon = H / (EA \cdot 100)$ — относительное удлинение ванты в плоскости кольца; μ — отношение длины ванты к пролету; β — угол наклона к горизонту линии, соединяющей опорные точки ванты; 100 — коэффициент перехода от МПа к Н/см².

Вертикальные и наклонные растяжки между вантами в двух-поясных покрытиях рассчитывают с использованием формул (VIII.57), (VIII.58).

Сечение распорок между несущими и стабилизирующими вантами назначают из расчета на устойчивость при центральном сжатии по формуле (XII.49). Гибкость распорок не должна превышать 180. Для подбора сечения распорок в прил. 9 приведена выборка из сортамента стальных труб. Значения коэффициента продольного изгиба φ приведены в прил. 5.

В винтовых стяжках подлежат проверке прочность их по сечению с резьбой:

$$N \leq n A_{bn} R_{bt} \cdot 100, \quad (\text{VIII.60})$$

где n — число стяжных болтов; A_{bn} — площадь сечения стяжного болта по внутреннему диаметру резьбы (принимают по прил. 4); R_{bt} — расчетное сопротивление растяжению болта из стали повышенной прочности (принимают по прил. 3); 100 — коэффициент перехода от МПа к Н/см².

§ VIII.8. ОСНОВЫ РАСЧЕТА МЕМБРАН

В сферической провисающей мембране под действием равномерно распределенной нагрузки меридиональные и кольцевые усн-

лия действуют так же, как и в куполе [см. вывод формул (XII.20) и (XII.21)], только являются растягивающими:

$$N_1 = q r / 2; \quad N_2 = q r / 2 \cos 2 \varphi, \quad (\text{VIII.61})$$

где N_1 — линейное меридиональное усилие; N_2 — линейное кольцевое усилие; q — расчетная равномерно распределенная нагрузка на 1 м^2 горизонтальной проекции мембраны; r — радиус кривизны мембраны — его значение зависит от пролета и стрелы провисания оболочки: $r = (l^2 + 4f^2) / (8f)$; φ — угол наклона касательной в рассматриваемом кольцевом сечении мембраны к горизонтальной плоскости.

В цилиндрической провисающей мембране от равномерно распределенной нагрузки q возникают такие же растягивающие усилия, как в висячих оболочках с параллельными вантами [см. вывод формулы (VIII.3)]:

$$N = [q l^2 / (8 f)] \sqrt{1 + 16 f^2 / l^2}, \quad (\text{VIII.62})$$

где l — перекрываемый пролет; f — стрела провисания мембраны (аналогично рис. VIII.1,а).

В мембране из переплетенных лент (см. рис. VI.12) действуют растягивающие усилия:

$$N = k q l^2 / (8 f), \quad (\text{VIII.63})$$

где k — коэффициент, учитывающий работу лент другого направления (его принимают равным 0,585 согласно исследованиям ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко [54]); l — пролет ленты (в покрытиях с круглым планом пролет ленты равен диаметру мембраны).

В мембранах шатрового типа усилия в секторе с шириной l у наружного опорного кольца можно определять, как для аналогичной, по форме висячей оболочки [см. рис. VIII.2,б и вывод формулы (VIII.19)]:

$$N = [q l^2 / (16 f)] \sqrt{1 + [8 f / (3 l) + \operatorname{tg} \beta]^2}, \quad (\text{VIII.64})$$

где β — угол наклона к горизонтальной плоскости линии, соединяющей в меридиональном сечении наружный опорный контур и центральное кольцо; q — расчетная равномерно распределенная нагрузка от покрытия на 1 м^2 проекции пола.

В двухслойной мембранной оболочке с поверхностью гипар усилия в несущих лентах определяют по формуле (VIII.62), поскольку при полной расчетной нагрузке q стабилизирующие ленты могут полностью выключаться из работы покрытия [в формуле (VIII.35) Δp можно принимать равной нулю].

Толщина мембраны из условия прочности участка шириной l определяют по формуле

$$t \geq N / (100^2 R_v), \quad (\text{VIII.65})$$

где N — расчетное усилие, Н/м; R_v — расчетное сопротивление металла листов оболочек по пределу текучести, МПа (его принимают по прил. II и 2).

§ IX.1. ВИСЯЧАЯ ОБОЛОЧКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВАНТАМИ

Поперечный разрез здания применительно к крытому бассейну с двухсторонними трибунами на 4000 мест показан на рис. IX.1. Длина зала 60 м, шаг рамных конструкций трибун 12 м. Сток воды с покрытия — к торцам здания. Шаг вант 1,5 м, кровля — тяжелая. Место строительства — Свердловск.

Подсчет нагрузок на 1 м² покрытия

Состав покрытия	Нормативная нагрузка, Н/м ²	Коэффициент перегрузки	Расчетная нагрузка, Н/м ²
Нагрузка до предварительного напряжения вант			
Стальные канаты	90	1,1	99
Сборные железобетонные плиты — приведенная толщина 5 см, плотность 2500 кг/м ³	1250	1,1	1375
Итого	1340	—	1474

Нагрузка после напряжения вант пригрузом

Заливка швов бетоном	200	1,1	220
Клеечная пароизоляция	30	1,3	39
Пенобетон толщиной 14 см, плотностью 500 кг/м ³	700	1,2	840
Цементная стяжка — толщина 2 см, плотность 1800 кг/м ³	360	1,3	468
Трехслойный рулонный ковер	100	1,3	130
Снеговая нагрузка для III района СССР	1000	1,4	1400
Итого	2390	—	3097

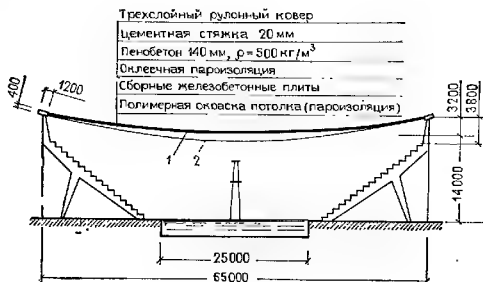


Рис. IX.1. Поперечный разрез висячей оболочки с параллельными вантами (пример)

1 - провисание вант посередине здания; 2 - провисание вант у торцов при уклоне кровли 2%

Расчетную линейную нагрузку на ванту определяем по формуле (VIII.7)

$$q = (1474 + 1,2 \cdot 3097) 1,5 = 7786 \text{ Н/м} = 7,79 \text{ кН/м}.$$

По формулам (VIII.1)–(VIII.3) находим распор, вертикальную составляющую опорной реакции и усилие растяжения ванты:

$$H = \frac{7,79 \cdot 65^2}{8 \cdot 3,2} = 1286 \text{ кН}; \quad V = \frac{7,79 \cdot 65}{2} = 253 \text{ кН};$$

$$N = \sqrt{1286^2 + 253^2} = 1311 \text{ кН}.$$

Требуемая площадь сечения ванты из стального каната ЛК-РО при $R_{\text{уп}} = 1764 \text{ МПа}$ по формуле (VIII.58):

$$A \geq \frac{1,6 \cdot 1311000}{0,75 \cdot 1764 \cdot 100} = 15,85 \text{ см}^2 = 1585 \text{ мм}^2.$$

По прил. 13 принимаем канат двойной свивки ЛК-РО конструкции 6Х3 диаметром 57 мм с временным сопротивлением проволок разрыву $R_{\text{уп}} = 1764 \text{ МПа}$. Площадь сечения каната $A = 1520,73 \text{ мм}^2$ (перенапряжение составляет 4%, что считается допустимым).

Нормативная нагрузка на ванту до предварительного напряжения:

$$q^n = 1340 \cdot 1,5 = 2010 \text{ Н/м} = 20,1 \text{ Н/см}.$$

Прогиб ванты после укладки плит покрытия вычисляем по формуле (VIII.8):

$$\mu = 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{3,2}{65} \right)^2 = 1,00646; \quad E = 147 \text{ ГПа};$$

$$\Delta f = \frac{3}{128} \frac{1,00646^2}{320^3} \frac{20,1 \cdot 6500^4}{15 \cdot 10^4 \cdot 15,0329 \cdot 100} = 36,9 \text{ см},$$

что в отношении к пролету составляет

$$\Delta f/l = 36,9/6500 = 1/176 > 1/300.$$

Этот прогиб ванты погашаем путем назначения первоначальной длины ванты в осях по формуле (VIII.9):

$$S_0 = 6500 \left(1 + \frac{8 \cdot 320^2}{3 \cdot 6500^2} - \frac{20,1 \cdot 6500^2}{8 \cdot 320 \cdot 15 \cdot 10^4 \cdot 15,0329 \cdot 100} \right) = 6532,4 \text{ см}.$$

Угол наклона ванты к горизонту в точке закрепления к бортовому элементу:

$$\cos \varphi = H/N = 1286/1311 = 0,9809; \quad \varphi = 11^\circ 12'.$$

Назначаем угол наклона сечения бортового элемента к горизонту (рис. II.14):

$$\varphi_{б.э} = 11^\circ.$$

§ IX.2. ШАТРОВОЕ ПОКРЫТИЕ

Поперечный разрез выставочного павильона с планом в виде двух концентрических окружностей показан на рис. IX.2. Состав кровли такой же, как в предыдущем примере. Место строительства — Свердловск.

Назначаем размеры поперечного сечения наружного опорного кольца промежуточного:

$$h_1 = 90000/100 = 900 \text{ мм}; \quad b_1 = 0,3 \cdot 900 = 270 \text{ мм (300 мм)};$$

$$h_2 = 60000/100 = 600 \text{ мм}; \quad b_2 = 0,3 \cdot 600 = 180 \text{ мм (200 мм)}.$$

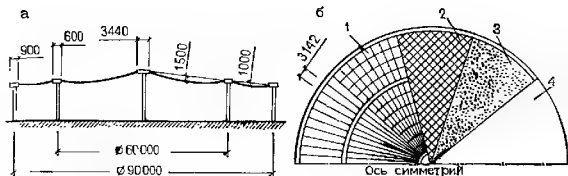


Рис. 1X.2. Шатровое покрытие (пример)

а — поперечный разрез; б — план; 1 — сборные железобетонные плиты; 2 — пароизоляция и утеплитель; 3 — выравнивающая стяжка; 4 — рулонный ковер

Принимаем число вант $n=90$, в этом случае шаг вант по наружному опорному кольцу и промежуточному кольцу составляет:

$$a_2 = \pi D_2 / n = 3,142 \cdot 90 / 90 = 3,142 \text{ м};$$

$$a_1 = \pi D_1 / n = 3,142 \cdot 60 / 90 = 2,094 \text{ м}.$$

Назначаем шаг вант по центральному кольцу 120 мм и вычисляем его диаметр:

$$D_c - a_c n / \pi = 120 \cdot 90 / 3,142 = 3438 \text{ мм} = 3,44 \text{ м}.$$

Определяем линейные нагрузки на ванты в соответствии с расчётной схемой на рис. VIII.3:

$$q_1 = (1474 + 1,2 \cdot 3097) 2,094 = 10\,868 \text{ Н/м} = 10,87 \text{ кН/м};$$

$$q_2 = (1474 + 1,2 \cdot 3097) 3,142 = 16\,308 \text{ Н/м} = 16,31 \text{ кН/м}.$$

По формулам (VIII.17) и (VIII.19) вычисляем распор и наибольшее растягивающее усилие в ванте среднего пролета:

$$H_1 = 10,87 \cdot 30^2 / (16 \cdot 1,5) = 408 \text{ кН}; \quad \text{tg } \beta_1 = 3000 / 30\,000 = 0,1;$$

$$N_1 = 408 \sqrt{1 + [(8 \cdot 1,5 / (3 \cdot 30) + 0,1)]^2} = 419 \text{ кН};$$

$$N_1 = 408 \sqrt{1 + [16 \cdot 1,5 / (3 \cdot 30) - 0,1]^2} = 414 \text{ кН}.$$

С большим усилием ванта растягивается у верхнего конца.

Распор и опорные реакции концов ванты крайнего пролета находим по формулам (VIII.22) и (VIII.24):

$$H_2 = \frac{10,87 \cdot 15^2}{8 \cdot 1} + \frac{(16,31 - 10,87) 15^2}{16 \cdot 1} = 382 \text{ кН};$$

$$\text{tg } \beta_2 = 1000 / 15\,000 = 0,0667;$$

$$V_2' = \frac{10,87 \cdot 15}{2} + \frac{(16,31 - 10,87) 15}{3} - 382 \cdot 0,0667 = 83 \text{ кН};$$

$$V_2'' = \frac{10,87 \cdot 15}{2} + \frac{(16,31 - 10,87) 15}{6} + 382 \cdot 0,0667 = 121 \text{ кН}.$$

С большим усилием ванта крайнего пролета растягивается в точке закрепления к промежуточному опорному кольцу:

$$N_2 = \sqrt{382^2 + 121^2} = 401 \text{ кН}.$$

Растягивающее усилие в центральном кольце по формуле (VIII.25):

$$N_k = 408 \cdot 30 / 2,094 = 5845 \text{ кН}.$$

Сжимающее усилие в промежуточном кольце по формуле (VIII.26):

$$N_{п.к} = (408 - 382) 30/2,094 = 372 \text{ кН.}$$

По формуле (VIII.27) находим усилие сжатия в наружном опорном кольце:

$$N_{в.к} = 382 (30 + 15)/3,142 = 5471 \text{ кН.}$$

Требуемая площадь сечения ванты среднего пролета по формуле (VIII.57):

$$A \geq 419\,000/(500 \cdot 100) = 8,38 \text{ см}^2.$$

По прил. 12 принимаем стержень диаметром 36 мм из арматурной стали класса А-IV с $A=10,18 \text{ см}^2$.

Требуемая площадь сечения ванты крайнего пролета из арматурной стали класса А-IV:

$$A \geq 401\,000/(500 \cdot 100) = 8,02 \text{ см}^2.$$

По прил. 12 принимаем стержень диаметром 32 мм с $A=8,042 \text{ см}^2$.

По формуле (VIII.50) рассчитываем диаметр хвостовика (нарезного конца) из болта класса 5.6 для ванты среднего пролета:

$$A_{bn} \geq 419\,000/(210 \cdot 100) = 19,95 \text{ см}^2.$$

По прил. 5 принимаем нарезной хвостовик диаметром 56 мм с $A_{bn} = 20,5 \text{ см}^2$.

Подбираем сечение растянутого центрального кольца из стали ВСтЗпс6 по ГОСТ 380—71*:

$$A \geq 5\,845\,000/(225 \cdot 100) = 260 \text{ см}^2.$$

Принимаем сечение в виде сварного двутавра из трех листов размером $500 \times 20 \text{ мм}$ с учетом отверстия в стенке для хвостовика: $A_n = 3 \cdot 50 \cdot 2 - 2 \cdot 6 = 288 \text{ см}^2$.

Проверим устойчивость наружного кольца по формуле (VIII.59) (бетон марки М200; $E_6 = 24\,000 \text{ МПа}$):

$$E_k J_k = 0,85 \cdot 24\,000 \cdot 30 \cdot 90^3 / 12 = 3,72 \cdot 10^{10} \text{ МПа} \cdot \text{см}^4;$$

$$\varepsilon = \frac{382\,000}{200\,000 \cdot 10,18 \cdot 100} = 0,00188; \quad \cos \beta_2 = \frac{15}{\sqrt{15^2 + 1^2}} = 0,998;$$

$$\mu = \frac{1}{0,998} + \frac{4(10,87^2 + 16,31^2) + 7 \cdot 10,87 \cdot 16,31}{360 \cdot 382^2} 15^2 \cdot 0,998^3 = 1,0138;$$

$$c = \frac{5\,471\,000}{0,00188 + (1,0138 - 1)/0,998^2} = 1,837 \cdot 10^8 \text{ Н};$$

$$N_{кр} = \frac{2 \cdot 3,72 \cdot 10^{10} \cdot 100}{4500^2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{1,837 \cdot 10^8 \cdot 4500^2}{3,72 \cdot 10^{10} \cdot 100}} \right) = 11\,990 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

что в 2,19 раза больше действующего усилия. Следовательно, устойчивость кольца обеспечена.

§ IX.3. ДВУХПОЯСНОЕ ПОКРЫТИЕ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВАНТАМИ

Рассчитаем двухпоясное покрытие для здания спортивного назначения тем же габаритами, что у крытого бассейна. Поперечный разрез здания приведен на рис. IX.3. Шаг вант 3 м, кровля — двухслойные плиты из стального профилированного листа и пенопласта.

При отношении нормативной нагрузки от собственной массы покрытия нормативной нагрузке от снегового покрова $45,5/100 = 0,455$, согласно СНиП [50], коэффициент перегрузки для снега составляет 1,56.



Рис. IX.3. Поперечный разрез двухслойного покрытия с параллельными вантами (пример)

Подсчет нагрузок на 1 м² покрытия

Состав покрытия	Нормативная нагрузка, Н/м ²	Коэффициент перегрузки	Расчетная нагрузка, Н/м ²
Стальные канаты и распорки	200	1,1	220
Стальной профилированный настил Н60-782-1	133	1,1	146
Фенольный пенопласт ФРП-1 толщиной 50 мм, плотностью 60 кг/м ³	30	1,2	36
Слой припененного рубероида	12	1,2	14
Двухслойный рулонный ковер	80	1,3	104
Итого	455	—	520

Расчетная снеговая нагрузка на 1 м² покрытия:

$$1000 \cdot 1,56 = 1560 \text{ Н/м}^2.$$

Расчетная линейная нагрузка на ванту по формуле (VIII.32):

$$q = (520 + 1560) \cdot 3 = 6240 \text{ Н/м} = 6,24 \text{ кН/м}.$$

Линейная нагрузка для предварительного натяжения стабилизирующей ванты по формуле (VIII.34):

$$\alpha = 0,1; p_0 = 6,24 \frac{0,1 \cdot 2}{0,1 \cdot 2 + 3} = 0,39 \text{ кН/м};$$

$$\Delta p = 0,3 \cdot 0,39 = 0,117 \text{ кН/м}.$$

Растягивающее усилие в несущей ванте находим по формуле (VIII.35):

$$N_H = (6,24 + 0,117) \cdot 65^2 / (8 \cdot 3) = 1119 \text{ кН};$$

$$V_H = (6,24 + 0,117) \cdot 65 / 2 = 207 \text{ кН};$$

$$N_H = \sqrt{1119^2 + 207^2} = 1138 \text{ кН};$$

Растягивающее усилие в стабилизирующей ванте по формулам (VIII.36):

$$N_C = (0,392 + 0,117) \cdot 65^2 / (8 \cdot 2) = 134,4 \text{ кН};$$

$$V_c = (0,392 + 0,117) 65/2 = 16,5 \text{ кН};$$

$$N_c = \sqrt{134,4^2 + 16,5^2} = 135 \text{ кН}.$$

Сжимающие усилия в распорках между вантами определяем по формуле (VIII.38);

$$N_p = (6,24 + 0,117) 3 = 19,1 \text{ кН}.$$

Требуемая площадь сечения несущей ванта из стального каната ЛК-РО при $R_{un}=1568$ МПа по формуле (VIII.58):

$$A \geq \frac{1,6 \cdot 138\,000}{0,8 \cdot 1568 \cdot 100} = 14,52 \text{ см}^2 = 1452 \text{ мм}^2.$$

По прил. 13 принимаем канат двойной свивки ЛК-РО конструкции 6×36 диаметром 57 мм с временным сопротивлением проволоки разрыву $R_{un}=1568$ МПа; площадь сечения каната $A=1520,73 \text{ мм}^2$.

Требуемая площадь сечения стабилизирующей ванта из стального каната ЛК-Р при $R_{un}=1372$ МПа:

$$A \geq \frac{1,6 \cdot 135\,000}{0,85 \cdot 1372 \cdot 100} = 1,85 \text{ см}^2 = 185 \text{ мм}^2.$$

По прил. 13 принимаем канат спиральный ЛК-Р конструкции 6×19 диаметром 20,5 мм с временным сопротивлением проволоки разрыву $R_{un}=1372$ МПа; площадь сечения каната $A=192,11 \text{ мм}^2$.

Подбираем сечение распорки из условия ее устойчивости:

$$i_{min} = l_{ef}/\lambda_{max} = 500/180 = 2,78 \text{ см}.$$

По прил. 9 принимаем трубу $83 \times 1,8$ мм:

$$A = 4,59 \text{ см}^2; i = 2,87 \text{ см};$$

$$\lambda = 500/2,87 = 174; \varphi = 0,23;$$

$$\sigma = \frac{N_p}{\varphi A \cdot 100} = \frac{19\,100}{0,230 \cdot 4,59 \cdot 100} = 181 \text{ МПа},$$

что меньше расчетного сопротивления стали марки ВСтЗпс — $R_b=215$ МПа.

По формулам (VIII.37) вычисляем первоначальную длину несущей и стабилизирующей вант в осях здания:

$$S_n = 6500 \left(1 + \frac{8 \cdot 300^2}{3 \cdot 6500^2} - \frac{1119 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^4 \cdot 15,0329 \cdot 100} \right) = 6504,7 \text{ см};$$

$$S_c = 6500 \left(1 + \frac{8 \cdot 200^2}{3 \cdot 6500^2} - \frac{135 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^4 \cdot 2,3223 \cdot 100} \right) = 6491,2 \text{ см}.$$

§ IX.4. ПОКРЫТИЕ С ВАНТОВОЙ СЕТЬЮ И ОПОРНЫМ КОНТУРОМ ИЗ ДВУХ ВЗАИМНО ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ АРОК

Назначим сечение опорного контура и рассчитаем ванта для покрытия здания, поперечный разрез которого приведен на рис. IX.4. Шаг несущих вант 2 м, стабилизирующих — 3 м, кровля и снеговая нагрузка такие же, как в примере на рис. IX.3.

Размеры поперечного сечения наклонной арки в опорном контуре:

$$h \approx 65\,000/45 = 1444 \text{ мм}.$$

Принимаем: $h=1500$ мм;

$$b = 1500/3 = 500 \text{ мм}.$$

Расчетная нагрузка на несущую ванту по формуле (VIII.32):

$$q = (520 + 1560) 2 = 4160 \text{ Н/м} = 4,16 \text{ кН/м}.$$

Линейная нагрузка для предварительного натяжения стабилизирующей ванты по формуле (VIII.54):

$$\alpha = 0,5; p_0 = 4,16 \frac{6,5}{0,5 \cdot 6,5 + (65^2/65^2) 3,25} \frac{3}{2} = 3,12 \text{ кН/м};$$

$$\Delta p = 0,3 \cdot 3,12 = 0,94 \text{ кН/м}.$$

Усилия в несущей ванте определяем по формулам (VIII.35):

$$H_H = \frac{(4,16 + 3,12) \cdot 65^2}{8 \cdot 3,25} = 1183 \text{ кН};$$

$$V_H = \frac{(4,16 + 3,12) \cdot 65}{2} = 237 \text{ кН};$$

$$N_H = \sqrt{1183^2 + 237^2} = 1207 \text{ кН}.$$

Усилия в стабилизирующей ванте по формулам (VIII.36):

$$H_c = \frac{(3,12 + 0,94) \cdot 65^2}{8 \cdot 6,5} = 330 \text{ кН};$$

$$V_c = \frac{(3,12 + 0,94) \cdot 65}{2} = 132 \text{ кН};$$

$$N_c = \sqrt{330^2 + 132^2} = 355 \text{ кН}.$$

Требуемая площадь сечения несущей ванты из стального каната ЛК-Р по формуле (VIII.58):

$$A \geq \frac{1,6 \cdot 1207 \cdot 10^3}{0,83 \cdot 1764 \cdot 100} = 13,19 \text{ см}^2 = 1319 \text{ мм}^2.$$

По прил. 13 принимаем канат двойной свивки ЛК-Р конструкции 6×19 диаметром 55 мм с временным сопротивлением проволок разрыву $R_{un} = 1764 \text{ МПа}$; площадь сечения каната $A = 1379,27 \text{ мм}^2$.

Требуемая площадь сечения стабилизирующей ванты из стального каната ЛК-Р:

$$A \geq \frac{1,6 \cdot 355 \cdot 10^3}{0,83 \cdot 1764 \cdot 100} = 3,88 \text{ см}^2 = 388 \text{ мм}^2.$$

Принимаем канат двойной свивки ЛК-Р конструкции 6×19 диаметром 29,5 мм с временным сопротивлением проволок разрыву $R_{un} = 1764 \text{ МПа}$; площадь сечения каната $A = 404,55 \text{ мм}^2$.



Рис. IX.4. Седлообразное вантовое покрытие с опорным контуром из двух наклонных арок (пример)

§ IX.5. СФЕРИЧЕСКОЕ МЕМБРАННОЕ ПОКРЫТИЕ

Рассчитаем сферическое мембранное покрытие для стадиона диаметром 300 м. Стрела провисания мембраны $300/25=12$ м. Материал мембраны — листовая сталь ВСтЗпсб—2 по ТУ 14—1—3023—80. Кольцевой опорный контур из сборных железобетонных элементов. Район строительства — Москва.

Подсчет нагрузок на 1 м² покрытия

Состав покрытия	Нормативная нагрузка, Н/м ²	Коэффициент перегрузки	Расчетная нагрузка, Н/м ²
Стальная мембрана толщиной 6 мм, плотность металла 7850 кг/м ³	471	1,1	518
Пенобетон толщиной 120 мм, плотность 600 кг/м ³	600	1,2	720
Цементная стяжка толщиной 20 мм, плотность 1800 кг/м ³	360	1,3	468
Трехслойный рулонный ковер	100	1,3	130
Снеговая нагрузка для III района СССР	1000	1,4	1400
Итого	2531	—	3236

Радиус кривизны провисающей сферической мембраны:

$$R = (300^2 + 4 \cdot 12^2) / (8 \cdot 12) = 943,5 \text{ м.}$$

Меридиональное усилие в любом сечении мембраны и максимальное кольцевое усилие по формулам (VIII.61):

$$N_1 = 3,236 \cdot 943,5 / 2 = 1527 \text{ кН/м;}$$

$$N_2 = 3,236 \cdot 943,5 \cdot 1/2 = 1527 \text{ кН/м.}$$

Сжимающее усилие в опорном контуре мембраны по формуле (VIII.14)

$$N_K = 1527 \cdot 300 / (2 \cdot 1) = 229\,000 \text{ кН.}$$

Расчетное сопротивление листовой стали ВСтЗпсб—2 по прил. 1 к СНиП [51]: $R_y = 270$ МПа. По формуле (VIII.65) определяем требуемую толщину мембраны:

$$t \geq 1527\,000 / (100^2 \cdot 270) = 0,57 \text{ см} = 5,7 \text{ мм.}$$

Окончательно назначаем толщину мембраны 6 мм.

Назначаем размеры поперечного сечения опорного контура:

$$h = 300/75 = 4 \text{ м; } b = 300/250 = 1,2 \text{ м.}$$

По формуле (VIII.59) вычисляем значение критического сжимающего усилия в опорном контуре (бетон марки М300; $E_b = 26\,000$ МПа);

$$E_K J_K = 0,85 \cdot 26\,000 \cdot 120 \cdot 400^3 / 12 = 141 \cdot 10^{11} \text{ МПа} \cdot \text{см}^4;$$

$$e = \frac{1\,527\,000}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 100 \cdot 0,6 \cdot 100} = 0,00121; \cos \beta = 1;$$

$$\mu = 1 + \frac{18 \cdot 12^3}{5 \cdot 300^2} = 1,00576; c = \frac{229\,000 \cdot 10^3}{0,00121 + (1,00576^2 - 1)/1} = 17,94 \cdot 10^9 \text{ Н;}$$

$$N_{кр} = \frac{2 \cdot 141 \cdot 10^{11} \cdot 100}{15\,000^2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{17,94 \cdot 10^9 \cdot 15\,000^2}{141 \cdot 10^{11} \cdot 100}} \right) = 683\,000 \cdot 10^3 \text{ Н,}$$

что в 2,98 раза больше действующего усилия $N_K = 229\,000$ кН. Следовательно, устойчивость кольца обеспечена.

Раздел второй. РЕШЕТЧАТЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Глава X. Общие сведения

Из коротких металлических стержней можно образовывать различные пространственные решетчатые конструкции, пригодные для перекрытия больших пространств. Такие конструктивные системы в последнее время получили широкое распространение и их эффективно используют в плоских и криволинейных покрытиях общественных и производственных зданий.

Применение пространственных решетчатых конструкций в современном строительстве позволяет:

добиваться органичного единства конструкции и архитектурной формы;

создавать выразительные архитектурные решения внутреннего пространства и сооружения в целом;

перекрывать помещения с любой конфигурацией плана;

существенно облегчать массу покрытия, повышая за счет этого эффективность работы конструкции и ее полезные нагрузки;

за счет многократной повторяемости унифицировать элементы и узловые детали, обеспечивать возможность поточного изготовления их на высоко механизированных заводах;

удобно и легко транспортировать сборные элементы с завода-изготовителя к месту строительства;

свести работу на строительной площадке к простой и быстрой сборке элементов.

Недостатками пространственных решетчатых систем покрытий считают повышенную трудоемкость изготовления элементов и трудности выполнения узлов по сравнению с традиционными решениями металлических конструкций. При серийном изготовлении стандартных элементов на заводах эти недостатки следует рассматривать как особенности решетчатых конструкций из коротких стержней.

Единство решетчатой конструкции и архитектурной формы достигается не само собой, а только в том случае, когда к проектированию сооружения подходят как к синтезу архитектуры и строительного искусства. Пространственные решетчатые конструкции рассматривают не утилитарно, как физическую реальность и простую замену в покрытии балок или ферм, а как средство с широкими возможностями для достижения эстетической выразительности сооружения. Архитектурный замысел предопределяет тип пространственного покрытия, после чего решетчатая конструкция становится отправной точкой для воплощения идеи проекта. Пространственные решетчатые конструкции позволяют дополнительно выразить характерные черты современности, в частности индустриальность, массовость, универсальность.

Выразительность архитектурного решения внутреннего прост-

ранства и экстерьера сооружения получают как эстетическим осмысливанием известной пространственной решетчатой конструкции, так и комбинированием конструктивных элементов, применением различных форм плана покрытия, размещением опор, соотношением высоты помещения и его размерами в плане, устройством верхнего света и др. В процессе разработки проекта сооружения идет одновременный поиск художественно-эстетической выразительности и инженерной логики решетчатой конструкции.

В большепролетных, уникальных зданиях с покрытиями в виде пространственной решетчатой конструкции проблему архитектурной выразительности выдвигают на первый план, но обязательно решают такие вопросы, как рациональный выбор системы несущей конструкции, унификация ее элементов и удобство монтажа. При проектировании сооружений массового строительства применение архитектурно осмысленных стержневых конструкций связывают первую очередь с требованиями экономики, унификации, сборности, имеющими общегосударственное значение для нашего народного хозяйства. Однако и в этом случае решение архитектурной и конструктивной задач рассматривают параллельно, дополняя и корректируя их по ходу разработки проекта.

Стержневые пространственные металлические конструкции появились во второй половине XIX в. Шведлер разработал купольные покрытия из стержней с шарнирными узлами. Первый его купол диаметром 60 м был сооружен в 1874 г. в Вене. В куполах Шведлера стержни располагали по меридианам и концентрическим кольцам, между ними устанавливали раскосы, как показано на рис. XII.14, а, б. Вследствие сложностей при изготовлении и монтаже купол Шведлера не получил широкого распространения. В 1882 г. Фешль предложил систему звездчатого купола и разработал метод его расчета. Со второй половины XX в. звездчатые купола (рис. XII.14, в, г) очень широко применяют в строительной практике всего мира.

В начале 20-х годов американский инженер Фуллер разработал систему многогранного купола с ромбической решеткой. В СССР независимо от Фуллера систему кристаллического купола разработал проф. М. С. Туполев (МАрХИ). В 30-х годах проф. А. М. Гинзбург предложил двухпоясную конструкцию большепролетных сводов и куполов, представляющих собой как бы изогнутую по заданной поверхности перекрестно-стержневую плиту. Как плоская система эта плита была еще неизвестна.

Плоские решетчатые системы покрытий из коротких стержней появились в 40-х годах XX в. Французский инженер Ле Риколь построил из дерева первую перекрестно-стержневую конструкцию покрытия, назвав ее структурой¹. В 1942 г. Менгеринхаузен в Германии предложено первое конструктивное решение металл

¹ Пространственная конструкция покрытия была названа структурой по аналогии со строением морских одноклеточных организмов, именуемых радиляриями и состоящих из типовых повторяющихся форм. Результаты наблюдений за радиляриями послужили для Ле Риколь основой исследовательской деятельности.

ческой структуры. В 1944—1945 гг. Ваксманн по заданию американского правительства разработал перекрестно-стержневую конструкцию для ангара размером 116×236 м. Конструкция покрытия из металлических труб представляла собой горизонтально расположенную стержневую плиту с консольными свесами и опиранием в нескольких местах. По мнению Ваксманна, сооружение можно было расширять путем добавления стержней и узлов.

С 60-х годов, когда были найдены рациональные решения схем, узлов и появились методы расчета на ЭВМ сложных многократно статически неопределимых конструкций, решетчатые пространственные покрытия получили бурное развитие в мировой строительной практике и среди прогрессивных конструкций выдвинулись на одно из первых мест. Экономичность по расходу металла, индустриальность изготовления, активное участие архитекторов в эстетическом осмыслении этих конструкций способствовали появлению различных пространственных систем, характеризующихся богатым многообразием форм. В целом все решетчатые пространственные конструкции можно разделить на две основные группы: перекрестно-стержневые конструкции и сетчатые оболочки.

Глава XI. Перекрестно-стержневые конструкции

Металлические перекрестно-стержневые конструкции применяют в качестве плоских покрытий и междуэтажных перекрытий больших пролетных зданий различного назначения. По сравнению с конструкцией покрытия с параллельными фермами эти конструкции имеют примерно вдвое меньшую строительную высоту и экономичнее по расходу металла, хотя и уступают пока по приведенным затратам. Помимо преимуществ, отмеченных выше в гл. X, перекрестно-стержневые конструкции обладают следующими достоинствами: малая строительная высота покрытия или перекрытия, что позволяет снижать общий объем здания; значительная жесткость покрытия, дающая возможность крепить к нему подвесной транспорт; повышенная степень надежности покрытия от внезапного разрушения благодаря многосвязности системы.

Наличие ряда преимуществ еще не означает целесообразность повсеместного применения перекрестно-стержневых конструкций. Только знание и грамотный учет статических и конструктивных особенностей позволяют плоские стержневые системы использовать рационально, с максимальным эффектом.

Область применения перекрестно-стержневых конструкций в практике отечественного строительства весьма разнообразна. Прежде всего это покрытия выставочных павильонов и демонстрационных залов, театров, концертных и киноконцертных залов, торговых залов рынков и магазинов, легкоатлетических манежей, спортивных залов, катков, плавательных бассейнов, вестибюлей метро, складов, гаражей, производственных зданий. Кроме того, перекрестно-стержневые конструкции успешно применяют при устройстве крупноразмерных стен зданий.

§ XI.1. ТИПЫ ПЛИТ

Различные типы перекрестно-стержневых конструкций образуются пересечением плоских ферм в двух, трех и даже четырех направлениях. Поскольку в целом конструкции покрытия оказываются плоскими в виде пространственных стержневых плит (рис. XI.1, XI.2), то в дальнейшем сокращенно будем называть их плитами. При вертикальном расположении пересекающихся ферм плоскости верхних и нижних поясов плит разбивают на квадратные, треугольные и шестиугольные ячейки (рис. XI.1). Такие плиты

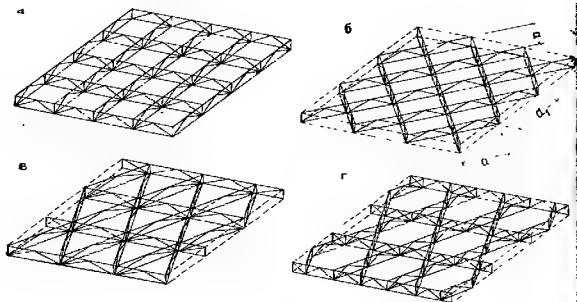


Рис. XI.1. Схемы покрытий из вертикальных перекрестных ферм

а, б — при расположении ферм в двух направлениях; в, г — при расположении ферм в трех направлениях

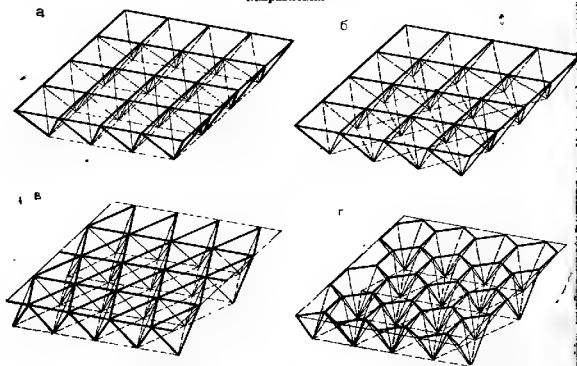


Рис. XI.2. Схемы перекрестно-стержневых конструкций из решетчатых пирамид

а, б — из пирамид с квадратным основанием (пентаэдров); в — из пирамид с треугольным основанием (тетраэдров); г — из пирамид с шестиугольным основанием (гексаэдров)

ты по геометрическому строению можно рассматривать как конструкцию, состоящую как бы из одитипных элементарных стержневых призм с квадратным, треугольным или шестиугольным основанием.

Наклонные фермы при взаимном пересечении образуют на плоскостях верхних и нижних поясов плит сетки с квадратной, треугольной и шестиугольной¹ ячейками. В плане ячейки поясов оказываются смещенными одна относительно другой. Такие плиты представляют собой конструкции, образованные как бы из многократно повторяющихся стержневых пирамид с квадратным, треугольным или шестиугольным основанием (рис. XI.2).

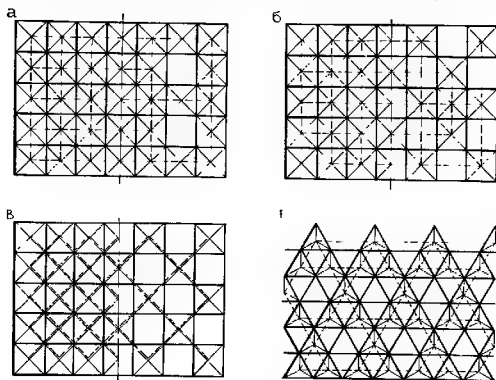


Рис. XI.3. Схемы разрежения стержневых плит, образуемых из пирамид (опираемые плиты по контуру)

а, б, в — при пентаэдрах; г — при тетраэдрах (толстые сплошные линии — верхние пояса; тонкие сплошные — раскосы; пунктирные — нижние пояса)

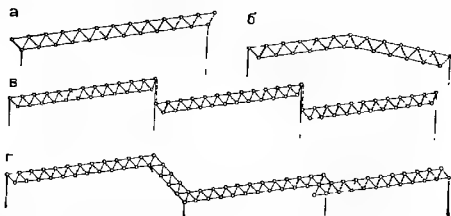


Рис. XI.4. Варианты использования перекрестно-стержневых конструкций в покрытиях с поперечным сечением различного профиля

а — односкатные покрытия; б — двускатные; в — шедовые; г — сложного профиля

¹ Сетку с шестиугольной ячейкой иногда в литературе называют гексагональной.

В плитах, образованных из пирамид, для облегчения конструкции, устройства проемов по функциональным соображениям, сокращения монтажных марок и достижения равнонапряженности несущего каркаса можно убирать отдельные стержни и группы стержней. При разрезении плит, как показано на рис. XI.3 и XI.2

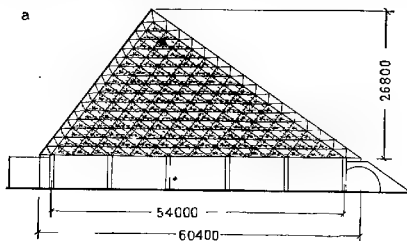


Рис. XI.5. Решетчатое покрытие крытого рынка в г. Тель-Авив

а — поперечный разрез; б — план

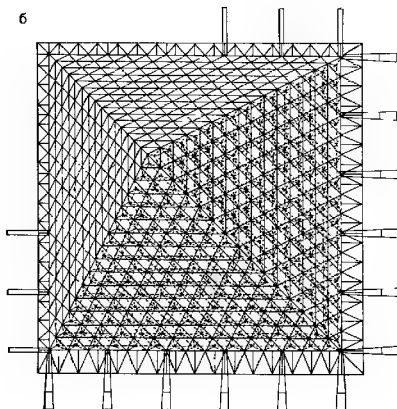


Рис. XI.8. Схематичный поперечный разрез покрытия плавательного бассейна в Метцинге (ФРГ)

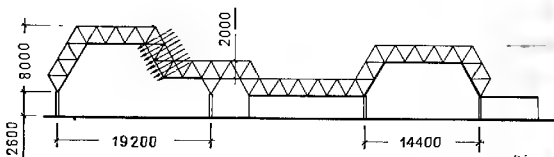
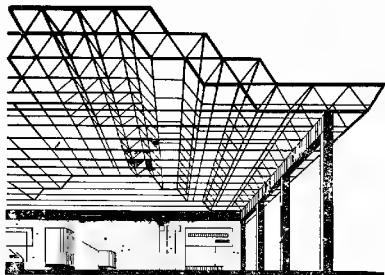


рис. XI.7. Пространственное решетчатое покрытие в виде усеченной пирамиды (торец условно не показан)



геометрическая неизменяемость сооружения в целом и устойчивость сжатых стержней сохраняются.

Стержневые плиты можно использовать не только в плоских покрытиях. Для них открыты широкие возможности при возведении покрытий односкатных, двускатных, шедовых и сложного профиля поперечного сечения. На рис. XI.4 приведены некоторые варианты образования различных профилей поперечного сечения покрытия.

При применении стержневых плит в покрытиях сложной формы создается несущая система, которая является основой объемно-планировочного решения и архитектурной выразительности здания в целом. В качестве примеров интересного использования стержневых плит можно привести крытый рынок в г. Тольятти (рис. XI.5), плавательный бассейн в Метцингене (рис. XI.6) и предложение С. Г. Поченцова, Б. В. Моргаевского по выполнению покрытия в виде усеченной пирамиды с кессонным углублением (рис. XI.7).

Рынок в г. Тольятти представляет собой пирамиду с основанием 54×54 м и высотой 26,8 м. Несущие грани пирамиды выполнены из стержневых плит с треугольной ячейкой. Пирамида опирается по периметру основания на 20 железобетонных опор-устоев и колонн. Плавательный бассейн в Метцингене перекрыт плитой, образовавшей сложный профиль поперечного сечения покрытия с отдельными участками шедового освещения.

§ XI.2. КОНСТРУКТИВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛИТ

Типы ячеек стержневых плит позволяют компоновать покрытия любой формы в плане — квадратной, прямоугольной, треугольной, шестиугольной, криволинейной и произвольной очертания. Основным условием при назначении формы плиты¹ является обеспе-

¹ Имеется в виду очертание формы на участке между опорами.

чение пространственной работы конструкции покрытия, т. е. принятия ею расчетных усилий в двух или трех направлениях. Только при таком подходе к применению стержневых плит покрытие будет легким и экономичным.

Для стержневых плит с квадратной ячейкой наиболее рациональна квадратная форма плана, в этом случае конструкция работает равноценно в обоих направлениях. При переходе к прямоугольной форме плана изгибающие моменты в коротком и длинном направлениях плиты становятся различными по значению. Увеличение при соотношении сторон прямоугольника $1:0,8$ в плите с опиранием по контуру влияние изгибающих моментов в коротком направлении увеличивается в 1,56 раза (см. рис. XI.30, схема 1), а в плите с опиранием по углам на четыре колонны влияние изгибающих моментов в длинном направлении возрастает в 2,25 раза (рис. XI.32, схема 12). При дальнейшем увеличении отношения сторон прямоугольника применение плит с ортогональной поясной сеткой становится нецелесообразным, поскольку практически все нагрузки воспринимают фермы одного направления. При диагональном расположении поясной сетки под углом 45° к контуру плиты возможно соотношение сторон и более $1:0,8$.

Плиты с квадратной и шестиугольной ячейками (рис. XI.1, XI.2) состоят из геометрически изменяемых стержневых призматических пирамид, вследствие чего они не могут под нагрузкой работать без кручения. При назначении различных консольных свесов покрытия и перекрытий необходимо следить за тем, чтобы изгиб консольных участков в основном был вдоль вылета. Из соображений жесткости консолей их вылет не должен превышать пять высот поперечного сечения плиты.

Плиты с треугольными поясными ячейками имеют геометрически неизменяемую пространственную сетку и являются более жесткими. Они удобны для сложных планов с разнообразными консолями. Однако такие плиты более сложны в конструктивном отношении и более трудоемки при монтаже из-за большого числа элементов. Одним из примеров использования подобных плит для сложной формы плана является Национальный павильон кассетных аппаратов на Всемирной выставке 1964—1965 гг. в Нью-Йорке (рис. XI.8). Междуэтажное перекрытие и покрытие имеют одинаковую конструкцию плиты.

Пространственный характер работы стержневой плиты позволяет назначать высоту поперечного сечения покрытия h в пределах $1/15—1/30$ пролета. Необходимо помнить, что высота покрытия прежде всего определяется очертанием сооружения в плане и условиями опирания плиты.

Следующим генеральным размером стержневой плиты является размер поясной ячейки. Обычно размер стороны ячейки назначают $1,2—3$ м. В этом случае кровля оказывается простой по конструкции и легкой. Если покрытие монтируют из отдельных стержневых «россыпью», то целесообразно унифицировать длину раскосов элементов поясов; в частности, при пентаэдрах из одиотипизированных элементов.

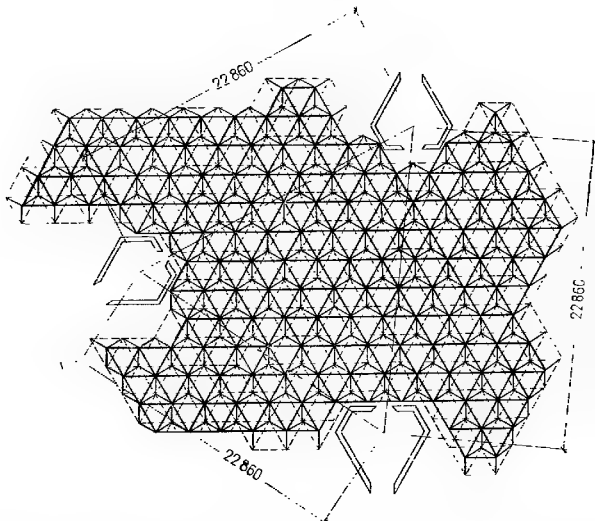


Рис. XI.8. Пример использования стержневой плиты для сложной формы плана (покрытие павильона на Всемирной выставке 1964—1965 гг. в Нью-Йорке)

стержней размер панели поясов составляет $h/\cos 45^\circ = 1,4142 h$, при тетраэдрах — $h/\sin 54^\circ 44' 08'' = 1,2247 h$ (где h — расстояние между поясами плиты).

§ XI.3. ОПИРАНИЕ СТЕРЖНЕВЫХ ПЛИТ

Расположение опор для стержневых плит определяется архитектурно-планировочным решением помещений. Одно из существенных преимуществ плит — возможность размещения опор в любой зоне конструкции в соответствии с замыслом архитектора. Однако эта возможность не освобождает от требований заставить покрытие работать пространственно, т. е. под действием нагрузки воспринимать усилия в двух или трех направлениях. На рис. XI.9 приведены основные варианты симметричного размещения опор в простейших случаях. Аналогично решается расположение колонн для покрытий с трапециевидным, шестигугольным и другим очертанием в плане. При назначении той или иной схемы опирания плит наряду с архитектурно-планировочными соображениями необходимо учитывать следующие конструктивные свойства.

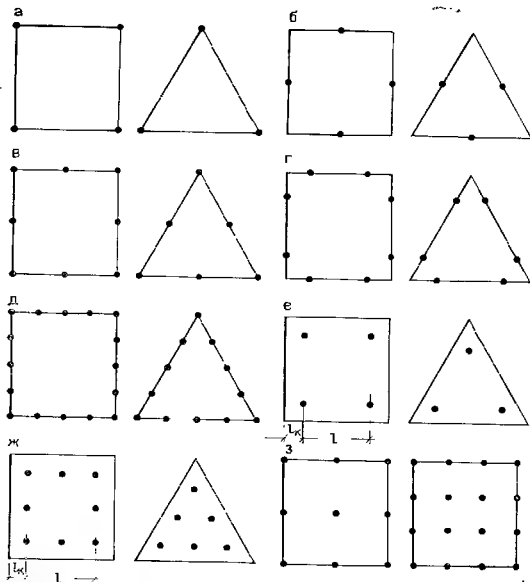


Рис. XI.9. Варианты симметричного размещения колонн для покрытий из стержневых плит с квадратным и треугольным очертанием в плане
 а — в углах здания; б, в — при угловых консолях; в, д — по периметру здания; е, ж — с консольными свесами; з — многопролетные системы (с внутриконтурным опиранием)

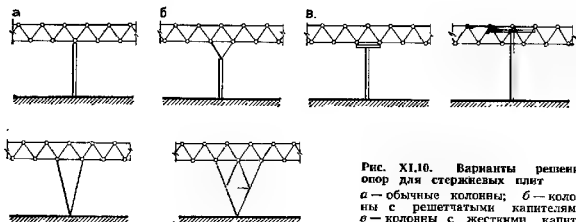


Рис. XI.10. Варианты решения опор для стержневых плит
 а — обычные колонны; б — колонны с решетчатыми капителями; в — колонны с жесткими капителями; г — пространственные опоры

При опирании покрытия по схемам рис. XI.9, а, б в опорных зонах стержневых плит возникают значительные усилия, поэтому расход металла на покрытие существенно увеличивается, что отрицательно сказывается на экономичности конструкции. Конструктивным приемом, позволяющим распределять реакцию колонны на значительную группу стержней опорной зоны и избегать излишнего расхода металла, является применение колонн с развитыми капителями или пространственных опор (рис. XI.10, XI.11).

При размещении колонн с небольшим шагом по контуру стержневых плит конструкция опор не усложняется и весовые показатели покрытий не ухудшаются (рис. XI.9, б; XI.10, а). Если колонны предусмотреть внутри контура плит, как показано на рис. XI.9, в, ж, то консоли с вылетом $l_k = (0,2 - 0,25) l$ окажут разгружающее влияние на распределение усилий в плитах, за счет чего экономичность покрытия существенно возрастет. В случае размещения колонн по периметру покрытия и внутри контура стержневая плита превращается в неразрезную конструкцию. Как и в многопролетных балках, опорные изгибающие моменты оказывают разгружающее влияние на участки плиты в пролете, приводя в итоге к экономии металла (рис. XI.37, б).

Для стержневых плит можно использовать различные комбинированные опоры. Такими опорами могут служить ваны, подстропильные фермы, арки (рис. XI.12). При подвеске покрытия к вантам внутренний габарит помещения не стесняется. Конструкции в виде колонн, ферм, арок являются жесткими, ваны для плит служат упругими опорами.

§ XI.4. КОНСТРУКЦИЯ СТЕРЖНЕЙ И УЗЛОВ

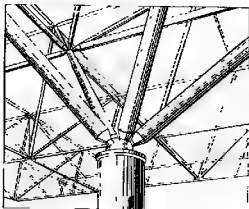
Наиболее рациональным профилем для стержней плит является труба круглого сечения. При условии одинаковой гибкости сжатого стержня применение круглой трубы позволяет экономить металл до 15% по сравнению с парой равнобоких уголков, соединенных между собой прокладками по аналогии с конструкцией стержней легких стропильных ферм. Вместо круглых труб можно успешно использовать холодногнутые сварные трубы квадратного сечения. Сортамент стальных круглых и квадратных труб приведен в прил. 9, 10, 11.

В практике строительства зданий с покрытиями из стержневых плит встречаются разнообразные сечения элементов из прокатных профилей: равнополочных уголков, тавров, двутавров, швеллеров, сплошных круглых стержней.

Прокатные уголки применяют в отечественных монтажных блоках «ЦНИИСК», английской системе «Спейс-дек», французской системе «Пирамитек». В плитах с поясными ячейками 6×6 — 12×12 м вертикальные перекрестные фермы можно изготовлять в обычном варианте — из двух уголков в каждом стержне¹. Дву-

¹ Примерами подобных решений являются выставочный павильон в Ленинграде, рынок в Волгограде, павильон механизации сельского хозяйства на Выставке перелового опыта УССР и Дворец культуры в Киеве [35, 38, 55].

а



б

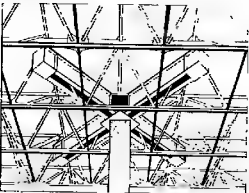


Рис. XI.11. Примеры решения опор капителей колонн
а — решетчатая капитель; б — жесткая капитель крестового типа

Рис. XI.12. Варианты комбинированных опор для стержневых плит
а, б, в, г — применение вант; д — использование подстропильных ферм; е — опирание на арки

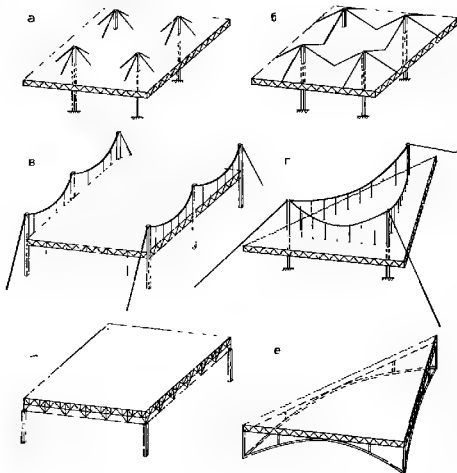


Рис. XI.13. Узловые соединения со сплюснутыми концами труб

I — соединение «ИФИ» (ГДР); II — соединение «Триодетик» (Канада); а — план (без шайб и болта); б — узел в разобранном виде; в — варианты соединяемых стержней; 1 — подкладная шайба; 2 — крышка; 3 — клиновидный накопечник; 4 — стяжной болт; 5 — гайка

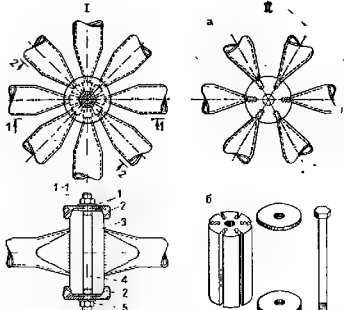
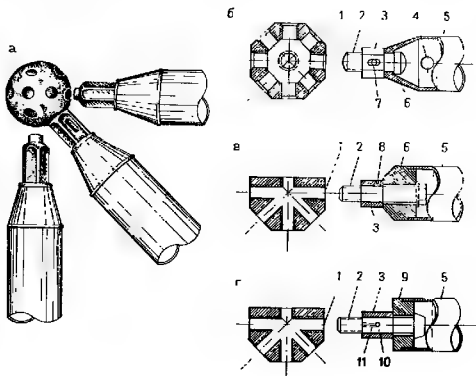
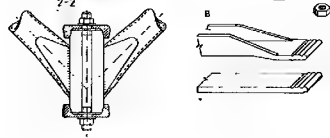


Рис. XI.14. Узловое соединение «Меро» и его модификации

а, б — общий вид узла, узловый элемент, и детали стержня системы «Меро» (ФРГ); в, г — детали трубчатых элементов в соединениях «Веймар» (ГДР) и МАрХИ (СССР); 1 — отверстие с внутренней резьбой; 2 — болт; 3 — поводковая гайка; 4 — монтажное отверстие; 5 — труба; 6 — оголовок трубы; 7 — ведущий палец; 8 — фиксатор; 9 — шайба; 10 — штифт; 11 — прорезь в гайке



тавровые профили используют во Франции в основаниях пирамид с квадратной и шестиугольной формой, в нашей стране — в системе стержневой плиты «ЦНИИСК». Швеллеры встречаются во многих конструктивных решениях плит. Круглые сплошные стержни применены в плите покрытия торгового центра под Копенгагеном (Дания).

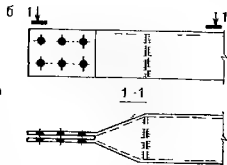
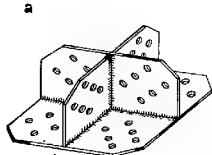


Рис. XI.15. Узловое соединение с штампованной фасонкой
а — общий вид сборки; б — фрагмент стержня

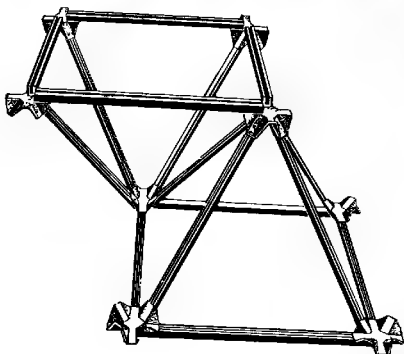
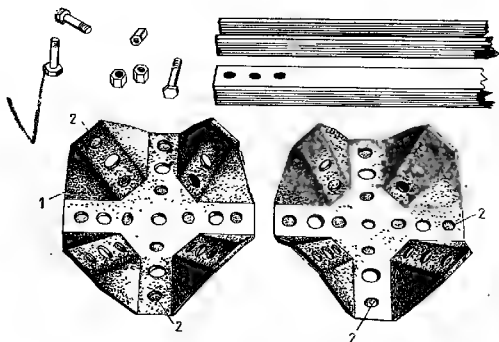


Рис. XI.16. Узловое соединение со штампованными фасонками. Фрагмент плиты («Юнистрат», США)

1 — фасонка; 2 — выштамповка для самоустойки элементов при сборке

Открытые гнутые профили широкого распространения не получили. Гнутые швеллеры эффективно используют в американской системе «Юнистрат».

Разнообразие конструктивных решений стержней в совокупности с системами плит, способами соединения и видами монтажной сборки пространственных конструкций обусловило чрезвычайно большое число вариантов узловых соединений и непрекращающуюся работу по их усовершенствованию. Причина многообразия узлов не случайна, ведь узловые соединения являются ответственным элементом стержневой плиты, определяющим как прочность и жесткость конструкции, так трудоемкость и технологичность ее изготовления и монтажа.

При постержневой сборке плит узловые соединения часто выполняют болтовыми с фасонными деталями или без них. Болтовые соединения позволяют ускорить процесс монтажа.

Для соединения трубчатых элементов применение фасонных деталей, как правило, необходимо. В местах примыкания к фасонным деталям концы труб либо сплюсывают и обрезают под нужным углом, как, например, в соединениях «ИФИ», «Триодетик» (рис. XI.13), либо только обрезают для устройства необходимого торца, как это предусмотрено в соединениях «Меро», «Веймар», МАрХИ (рис. XI.14).

В соединениях «ИФИ» «Триодетик» болт в основном выполняет фиксирующую функцию, стягивая узел. В соединениях «Меро» болт является ответственным несущим элементом, вследствие чего его выполняют только из высокопрочной стали. Для соединения элементов из гнутых и традиционных прокатных профилей при постержневой сборке плит болты используют в узлах со сварными пространственными фасонками (рис. XI.15) и в системах «Юнистрат» (рис. XI.16), ЦНИИСК (рис. XI.17). Применение сварных пространственных фасонек позволяет перекрывать стержневыми плитами пролеты 100 м и более.

Сварные соединения элементов при постержневой сборке плит используют реже болтовых вследствие большей трудоемкости сварки при монтажных работах. Однако эти соединения способны воспринимать большие усилия (>300 кН) и при значительных пролетах оказываются практически незаменимыми. Примерами сварных соединений трубчатых элементов являются узлы «ЦНИИСК», «Октаплатте» (рис. XI.18). Узел «ЦНИИСК» считается самым легким по сравнению с другими узлами, но для сборки стержней необходимы специальные кондукторы и квалифицированное исполнение ваинной сварки.

При укрупненной сборке стержневых плит уменьшается трудоемкость монтажных работ, а удобство и простота транспортирования отправочных элементов сохраняются. Достигается это следующими конструктивными решениями.

1. Плиты конструируют как сборные системы из однотипных стержневых пирамид (тетраэдров, пентаэдров, гексаэдров). В этом случае достигается значительное уменьшение числа монтажных узлов и даже упрощается их конструкция.

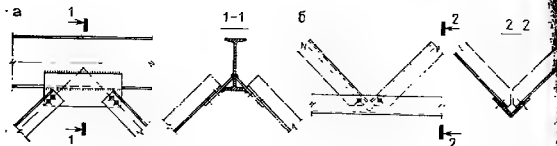


Рис. XI.17. Узловые соединения прокатных профилей в стержневой плите «ЦНИИС (СССР)

а — крепление раскосов к верхнему поясу; б — то же, к нижнему поясу

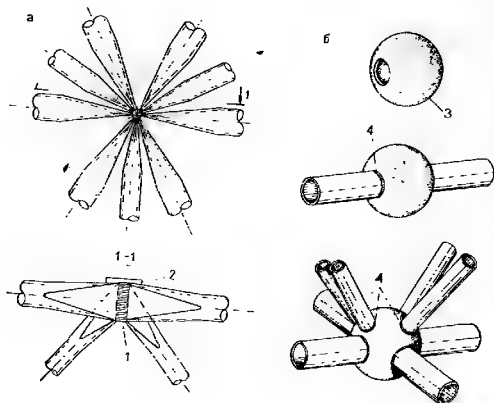


Рис. XI.18. Примеры сварных узлов стержневых плит

а — узловое соединение ЦНИИСК (СССР); б — узловое соединение «Октаплатте» (ФРГ)
1 — наплавленный металл (ванная сварка); 2 — опорный столик; 3 — полый шар; 4 — свар

Характерными примерами использования решетчатых пирамид являются системы «Спейс-дек» (рис. XI.19), «Пирамитек» (рис. XI.20)). Верхние пояса пирамид этих систем выполняют из прокатных уголков, что весьма упрощает соединение их между собой при сборке плиты (рис. XI.20, б). В строительной практике встречаются пирамиды и с иным сечением верхних поясов, например из прокатных двутавров. Вершины пирамид соединяют отдельными стержнями, для чего используют резьбовые приспособления, как, например, в системе «Спейс-дек», или сварку, как в системе «Пирамитек». Возможно и болтовое крепление стержней к вершинам пирамид, например с помощью болтов, работающих на срез

2. Дальнейшим развитием укрупнения монтажных изделий является объединение пирамид в группы, как это предусмотрено в системе «Спейс-грид» (рис. XI.21). При таком конструктивном решении отправочных элементов сохраняется их транспортабельность, присущая отдельным пирамидам. Особенностью системы «Спейс-грид» является выполнение верхнего пояса плиты из металлических панелей, способных воспринимать сжимающие усилия и выполняющих одновременно ограждающую функцию.

3. Иной принцип укрупнения монтажных элементов состоит в конструировании стержневых плит из плоских или трехгранных ферм одного направления, соединяемых в пространственную систему доборными элементами. Плоские фермы могут быть расположены вертикально или наклонно. Примером использования пространственных ферм служит система «Тюбакорд» (рис. XI. 22). В этой системе фермы с трехгранным поперечным сечением устанавливаются вплотную, в результате стержни верхнего пояса образуются из двух прокатных уголкового профиля. В перпендикулярном направлении фермы в уровне нижнего пояса соединяют доборными элементами, прикрепляемыми к узлам с помощью болтов. К недостатку пространственных ферм можно отнести недогрузку транспортных средств при перевозке крупногабаритных отправочных элементов.

4. Разновидностью укрупненной сборки плит является применение пространственных стержневых блоков. В данном случае стержни и узловые детали с завода-изготовителя доставляют на строительную площадку компактно упакованными, после чего на спе-

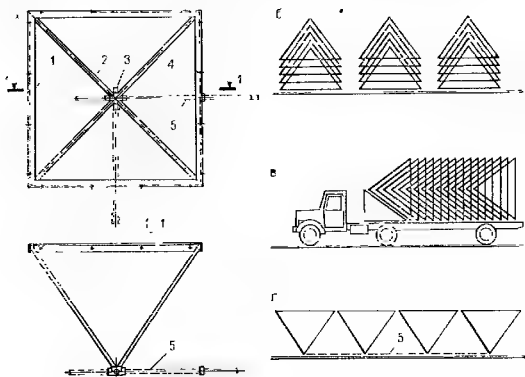


Рис. XI.19. Решетчатые пирамиды системы «Спейс-дек» (Англия)

а — план и разрез; б — положение пирамид при складировании; в — то же, при перевозке; г — то же, при монтаже; 1 — рама из уголков; 2 — трубчатые раскосы; 3 — узловой элемент со сверлениями и внутренней резьбой; 4 — отверстия для монтажных болтов; 5 — стержни нижних поясов с правой и левой резьбой на концах

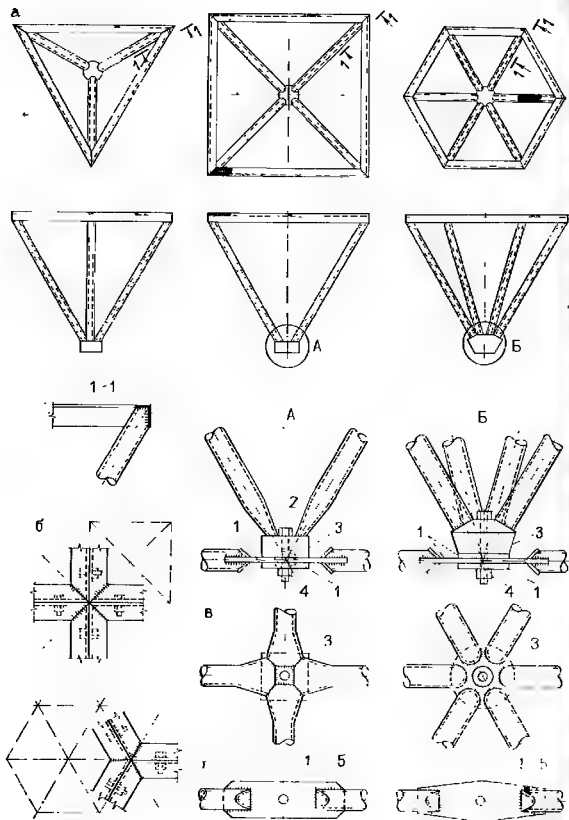


Рис. XI.20. Решетчатые пирамиды системы «Пирамитек» (Франция)

а — варианты пирамид; *б* — стыки верхних поясов пирамид с квадратной и шестиугольной ячейками; *в* — конструкция вершины пирамид с квадратной и шестиугольной ячейками (план); *г* — конструкция нижних поясов; *1* — горизонтальная фасонка; *2* — болт; *3* — фасонка вершины пирамиды; *4* — гайка; *5* — заглушка трубы

циальном кондукторе собирают пространственные блоки из элементов плиты. Блоки включают в себя также облегченную кровлю. Монтаж покрытия превращается в сборку конструкции из готовых блоков. Впервые блочная схема стержневых плит была разработана и применена в ГДР. Блокам с узловыми соединениями «ИФИ» было дано название «Берлин». В нашей стране покрытия

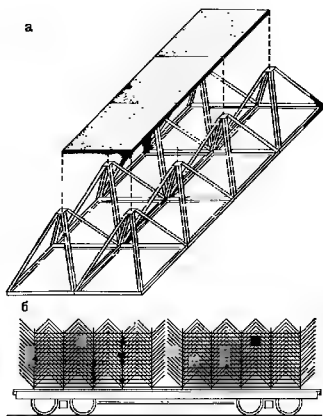


Рис. XI.21. Решетчатые пирамиды системы «Спейс-грид» (США)

а — общий вид группы пирамид;
б — транспортирование отправочных элементов

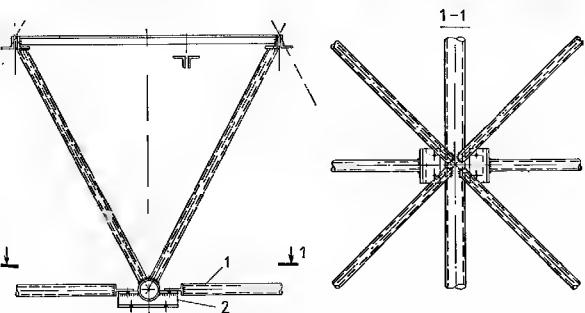


Рис. XI.22. Пример стержневой плиты из пространственных ферм (система «Тюбакорд», Франция).

1 — доборные элементы; 2 — обрезок двутавра для крепления монорейсов или балок подвесного потолка

из пространственных блоков получили широкое распространение в промышленном строительстве, причем блокам в плане назначены унифицированные размеры 18×12 и 24×12 м. На рис. XI.23 приведены основные схемы этих блоков, рабочие чертежи блоков имеются в Каталоге [48] и Справочнике [27].

5. Практически полной заводской готовности плит достигают путем использования стержневых конструкций, компактно сложен-

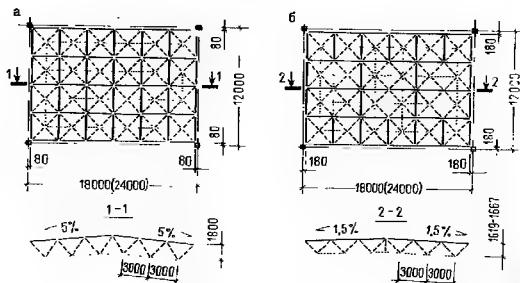


Рис. XI.23. Схема отечественных пространственных стержневых блоков укрупненной сборки крыш

а — блок типа «Берлин»
б — блок типа ЦНИИ

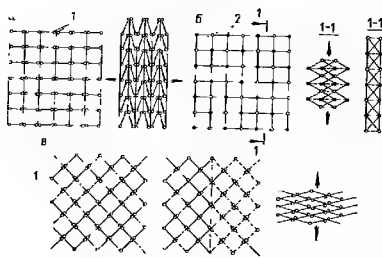


Рис. XI.24. Схемы стержневых плит раздвижной системы типа (план)

а — схема, разработанная Московским архитектурным институтом; б — то же, но с статуту ЦНИИПроект; в — стальконструкция; г — же, Свердловским архитектурным институтом; д — шарнирные узлы с вертикальной осью поворота; е — шарнирные узлы во взаимно пересекающихся плоскостях

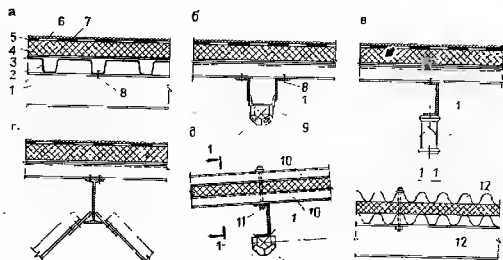


Рис. XI.25. Основные варианты теплой кровли в покрытиях со стержневыми плитами

а — общая конструкция кровли; б, в — варианты прогонов (опирание на узлы «Мархи» ИФИ); г — беспрогонное устройство кровли (при плите ЦНИИСК); д — пример вентилируемой кровли; 1 — прогоны (в системе блоков ЦНИИСК непосредственно верхний пояс плиты); 2 — профилированный настил; 3 — рулонная пароизоляция; 4 — литый пенопласт; 5 — защитный слой из рубероида; 6 — трехслойный рулонный ковер; 7 — гравийная защита; 8 — самонарезающие болты; 9 — опорный столик; 10 — профилированный алюминиевый лист; 11 — оцинкованные стальные болты; 12 — вентилируемые воздушные прослойки

ных при изготовлении для перевозки и раздвигаемых до проектного положения на строительной площадке во время монтажа. Варианты плит такого типа¹ показаны на рис. XI.24. Наибольшими преимуществами обладает конструкция плиты, разработанная в Свердловском архитектурном институте (САИ). При перекрытии существенных пролетов эту плиту расчленяют на несколько блоков, складываемых на заводе-изготовителе по короткому направлению, чем она выгодно отличается от длиномерной конструкции Московского архитектурного института (рис. XI. 24,а). В отличие от плиты ЦНИИПроектстальконструкций (рис. XI.24,б), габариты плиты САИ по высоте поперечного сечения h остаются постоянными, пояса с раскосами соединяют при изготовлении на заводе.

§ XI.5. УСТРОЙСТВО КРОВЛИ

По стержневым плитам устраивают облегченную кровлю, аналогичную обычно используемой в плоских покрытиях с металлическими фермами. Как правило, несущими элементами кровли служат профнастилованный металлический настил и легкие прогоны, опирающиеся на узлы плит непосредственно или через специальные столжки (рис. XI. 25). В покрытиях с плитами из прокатных профилей настил опирается прямо на верхние пояса из двутавра или пары швеллеров, хорошо работающих на местный изгиб (рис. XI. 25,з). В качестве утеплителя используют пенополистирольные или пенополиуретановые плиты, по ним выполняют гидроизоляционный ковер. Для предотвращения перегрева внутренней поверхности ограждения кровлю можно устраивать вентилируемой (рис. XI. 25,д).

В принципе допускается различное размещение кровельного ограждения в покрытиях со стержневыми плитами. На рис. XI.26 приведены возможные схемы расположения кровли. Холодную кровлю с теплым подвесным потолком (рис. XI. 26,б) можно применять в покрытиях зданий общественного назначения. Надстроенная кровля (рис. XI. 26,в) целесообразна тогда, когда при использовании горизонтальной плиты требуется определенный уклон кровли. При подвешивании кровли под нижним поясом плиты (рис. XI. 26) достигается эстетический эффект в экстерьере. В этом случае конструкцию покрытия следует выполнять из коррозионно-стойкого металла, например алюминиевого сплава.

При устройстве кровли по стержневым плитам в перспективе возможно весьма широко применять напыленные пенопласты (см. § III.2). Особенно удобно использовать напыленные пенопласты при наличии в покрытии зенитных фонарей, так как этим очень просто обеспечить надежную гидроизоляцию мест сопряжений.

Для естественного равномерного освещения помещений приме-

¹ В литературе иногда такие конструкции плит называются складывающимися. Поскольку назначение конструкций данного типа не складываться, а раздвигаться в период монтажа, то более целесообразно называть их раздвигающимися.

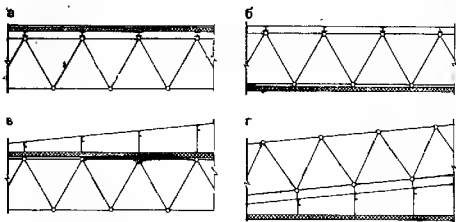


Рис. XI.26. Схемы расположения кровельного ограждения по стержневым плитам

а — обычный вариант тупой кровли; б — холодная кровля с теплым подвесным потолком; в — надстропильная кровля; г — вариант подвесной кровли (возможное горизонтальное положение стержневой плиты)

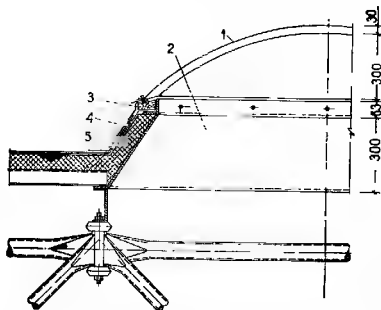


Рис. XI.27. Зенитный фонарь с куполами из органического (акрилового) стекла

1 — герметизирующая теплоизоляционная прослойка; 2 — стальной стакан трапезовидного сечения; 3 — деревянная опорная рама; 4 — фартук из оцинкованной кровельной стали; 5 — дополнительные слои рубероида ковры

няют зенитные фонари из органического стекла. Светопрозрачные купола устанавливают в уровне кровли или на опорных рамах, как показано на рис. XI. 27.

§ XI.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ПЛИТАХ

Если плиты рассчитывать точно, то их следует рассматривать как многократно статически неопределимые стержневые системы и использовать специально составленные программы для ЭВМ. Кроме того, при реальном проектировании усилия в стержнях различных зон плиты вычисляют в зависимости от геометрии конструкции, способов опирания, приложения нагрузок и т. д. На стадии эскизного проектирования стержневых плит можно применять приближенный метод расчета.

Методы приближенного статистического расчета плит различны. Можно определять усилия через прогибы путем интегрирования методом конечных разностей известного из строительной механики дифференциального уравнения напряженного состояния той плиты, как показано в учебнике К. К. Муханова [37]. Возмо

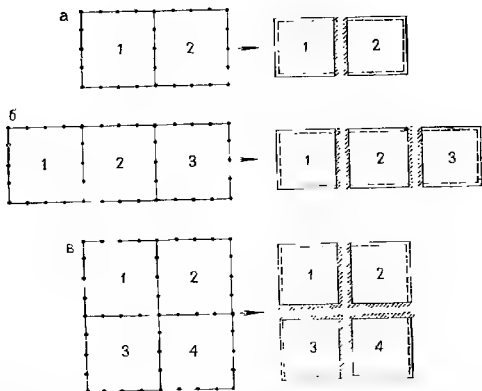


Рис. XI.28. Примеры расчленения неразрезной плиты на отдельные участки для определения изгибающих моментов

а — двухпролетное покрытие; б — трехпролетное; в — четырехпролетное

жен расчет плит с использованием справочных данных об изгибающих моментах в сплошных пластинах и данных об особенностях перехода от сплошных плит к стержневым. При наличии необходимых сведений расчет плит по этому методу значительно проще. Одновременно путем использования поправочных коэффициентов получают удовлетворительную точность вычисления усилий (поправочные коэффициенты учитывают различие в изгибе сплошных плит и стержневых, частично компенсируют неточности приближенного метода расчета).

В сплошных плитах при равномерно распределенной нагрузке p усилия M , Q определяют следующим образом.

Прямоугольные плиты. Изгибающие моменты и поперечные силы в прямоугольной плите зависят от условий опирания и соотношения сторон перекрытия. В основном различные схемы прямоугольных пластинок возможны в неразрезной конструкции с опиранием на ряды колонн или подстропильные элементы, когда для определения изгибающих моментов перекрытие расчленяют на отдельные участки, защемленные по линии сопряжения с соседними пролетами (рис. XI.28). Условные обозначения опирания плит, принятые на рис. XI.28 и далее, приведены на рис. XI.29.

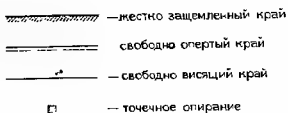


Рис. XI.29. Условные обозначения опирания плит

Схема 1

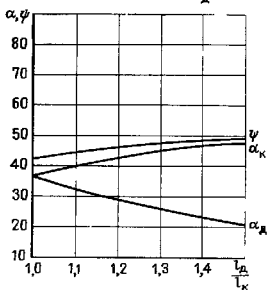
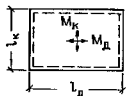


Схема 2

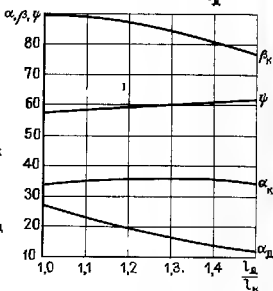
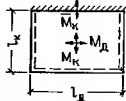


Схема 3

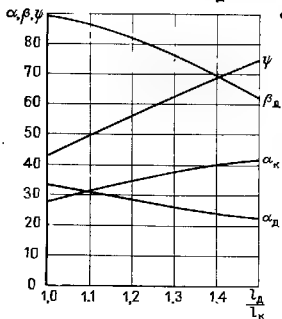
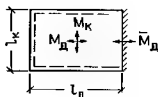


Схема 4

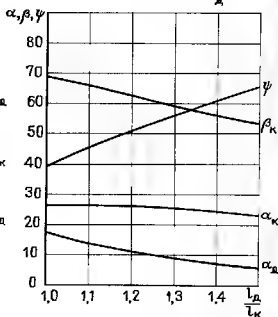
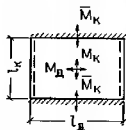


Рис. XI.30: Графики для определения усилий в прямоугольных плитах при равномерной распределенной нагрузке (коэффициент Пуассона $\nu=0$)

Схема 5

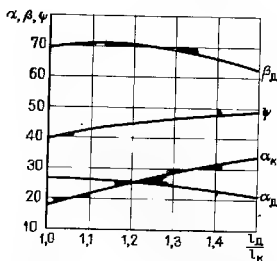
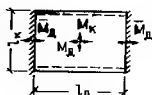


Схема 6

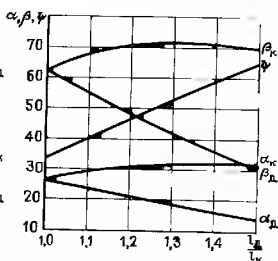
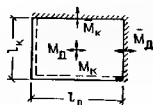


Схема 7

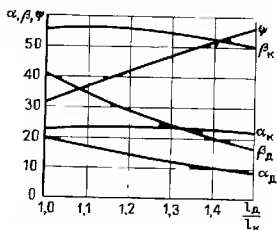
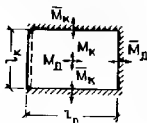


Схема 8

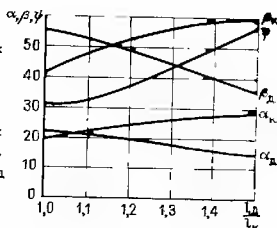
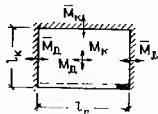


Рис. XI.31. Графики для определения усилий в прямоугольных плитах при равномерно распределенной нагрузке (коэффициент Пуассона $\nu=0$)

При перекрытии неразрезной плитой нескольких пролетов с опиранием на отдельные колонны изгибающие моменты определяют с использованием соответствующих схем 13—15 на Рис. XI.33.

Максимальные изгибающие моменты в плите для единичной

Схема 9

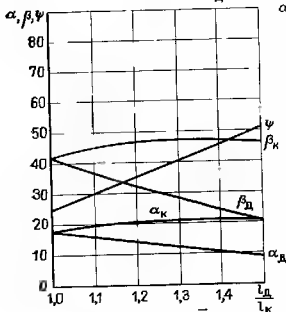
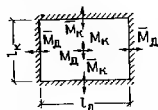


Схема 10

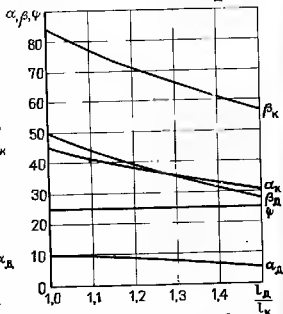
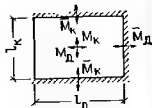


Схема 11

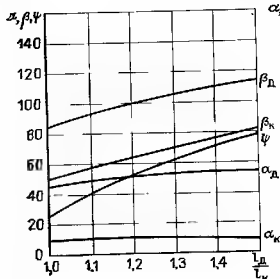
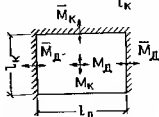


Схема 12

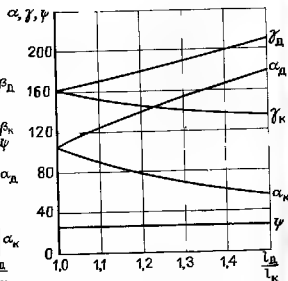
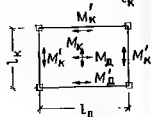


Рис. XI.32. Графики для определения усилий в прямоугольных плитах при равномерной нагрузке (коэффициент Пуассона $\nu=0$)

Схема 13

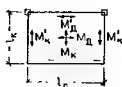


Схема 14

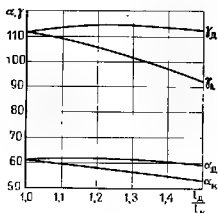
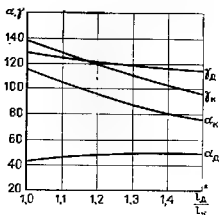


Схема 15



Схема 16

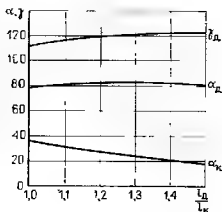
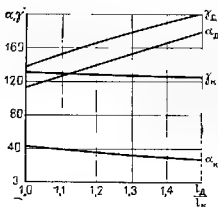
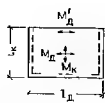


Рис. XI.33. Графики для определения усилий в прямоугольных плитах при равномерно распределенной нагрузке (коэффициент Пуассона $\nu=0$)

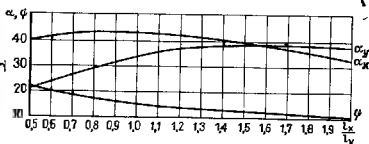
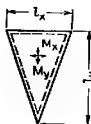


Рис. XI.34. Данные для определения усилий в треугольных плитах при равномерно распределенной нагрузке

полоски в зависимости от условий опирания и соотношения сторон l_x/l_y вычисляют по формулам:

$$\left. \begin{aligned} M_k &= \alpha_k p l_k l_d \cdot 10^{-3}; & M_d &= \alpha_d p l_k l_d \cdot 10^{-3}; \\ \overline{M}_k &= -\beta_k p l_k l_d \cdot 10^{-3}; & \overline{M}_d &= -\beta_d p l_k l_d \cdot 10^{-3}; \\ M'_k &= \gamma_k p l_k l_d \cdot 10^{-3}; & M'_d &= \gamma_d p l_k l_d \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \right\} \quad (XI.1)$$

Максимальные значения опорной реакции единицы ширины плиты:

$$V = \psi p l_k \cdot 10^{-2}. \quad (XI.2)$$

Коэффициенты $\alpha_k, \alpha_d, \beta_k, \beta_d, \gamma_k, \gamma_d, \psi$ определяют по графикам для соответствующей схемы плиты (рис. XI.30—XI.33).

Плиты различной конфигурации. Максимальные изгибающие моменты и опорные реакции в треугольной плите для единичной полоски в зависимости от соотношения сторон l_x/l_y вычисляют по формулам:

$$M_x = (\alpha_x p l_x l_y / 2) 10^{-3}; \quad M_y = (\alpha_y p l_x l_y / 2) 10^{-3}; \quad V = \psi p l_x \cdot 10^{-2}, \quad (XI.3)$$

где α_x, α_y, ψ — коэффициенты определяемые по графикам рис. XI.34.

Максимальные изгибающие моменты и опорные реакции эллиптической плиты для единичной полоски в зависимости от соотношения размеров l_x/l_k определяют по формулам:

$$M_k = \alpha_k p l_k^2 \cdot 10^{-3}; \quad M_d = \alpha_d p l_k^2 \cdot 10^{-3}; \quad V = \psi p l_k \cdot 10^{-2}, \quad (XI.4)$$

где α_k, α_d, ψ — коэффициенты, определяемые по графикам рис. XI.35.

В круглой плите (рис. XI.36,а) изгибающие моменты и опорные реакции для единичной полоски вычисляют по формулам:

$$M_r = M_t = 0,1875 p r^2; \quad \overline{M}_t = 0,125 p r^2; \quad V = 0,5 p r, \quad (XI.5)$$

где M_r — радиальный изгибающий момент M_t — тангенциальный изгибающий момент.

В секторных плитах изгибающие моменты и опорные реакции вычисляют по формулам:

для схемы на рис. XI. 36, б:

$$M_r = 0,0785 p r^2; \quad M_t = 0,0311 p r^2; \quad V = 0,426 p r; \quad (XI.6)$$

для схемы на рис. XI.36,в:

$$M_r = 0,0366 p r^2; \quad M_t = 0,0339 p r^2; \quad V = 0,35 p r. \quad (XI.7)$$

В плитах с опиранием на развитые капители колонн изгибающие моменты снижаются за счет уменьшения расчетного пролета (рис. XI.37).

После определения изгибающих моментов и опорных реакций усилия в стержнях плиты вычисляются по простым формулам статики в зависимости от схемы конструкции и условий ее опирания.

Экономическая эффективность любой конструкции зависит от того, насколько близко эпюра материала соответствует эпюре сил. Эпюры усилий в плите можно построить приближенно по мак-

Рис. XI.35. Данные для определения усилий в эллиптических плитах при равномерно распределенной нагрузке

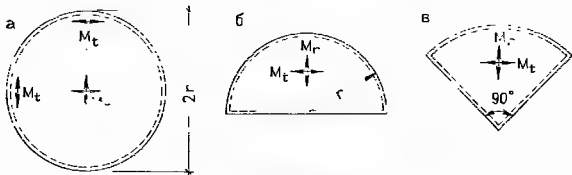
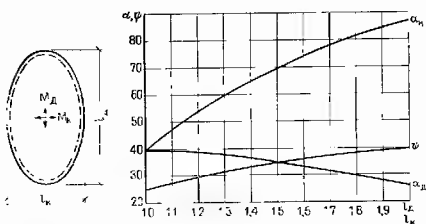


Рис. XI.36. Схемы круглой и секторных плит для определения усилий
а — круглая плита; б, в — секторные плиты

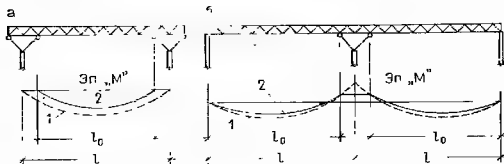


Рис. XI.37. Влияние развитых капителей колонн на изгибающие моменты в стержневой плите

а — однопролетное покрытие; б — двухпролетное покрытие; 1 — изгибающие моменты при колоннах без капителей; 2 — то же, с капителями

малым значениям усилий в поясах и опорных раскосах, как показано на рис. XI.38. Распределение усилий в поясах плиты вдоль пролетов l_k, l_d принимают ступенчатым по квадратной параболе, как бы соединяющей вычисленные значения изгибающих моментов на опорах и посередине плиты. Эпюру усилий в раскосах предполагают ступенчатой, изменяющейся вдоль треугольной эпюры поперечных сил в обычной балочной конструкции с известными значениями опорных реакций.

В перекрытии из вертикальных перекрестных ферм максимальные усилия в поясах N_{Π} и опорных раскосах N_p составляют: для схемы с квадратными поясными ячейками (рис. XI.1, а):

$$N_{\Pi} = \pm 2,1 M_{\max} a/h; \quad N_p = \mp 1,4 V a_1/\sin \alpha; \quad (XI.8)$$

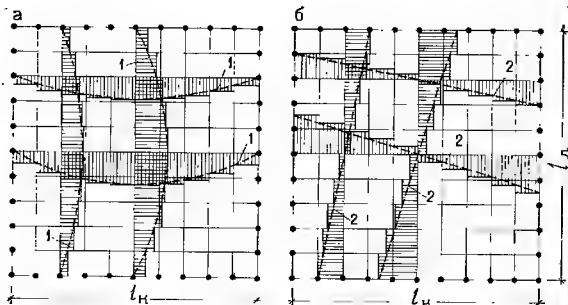


Рис. XI.38. Характер эпюры усилий в поясах (а) и раскосах (б) стержневой плиты; оптой по контуру

1 — эпюры изгибающих моментов; 2 — эпюры поперечных сил

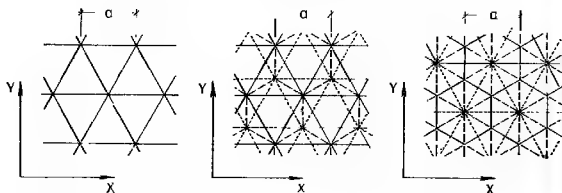


Рис. XI.39. Оси координат в стержневых плитах с треугольными и шестиугольными поясами сетками

для схемы с квадратными поясными ячейками, развернутым под углом 45° к сторонам плиты (рис. XI.1,б):

$$\left. \begin{aligned} N_p &= \pm 1,6 M_{\max} a / (\sqrt{2} h) = \pm 1,13 M_{\max} a / h; \\ N_p &= \mp 1,75 V a_1 / (2 \sin \alpha) = \mp 0,875 V a_1 / \sin \alpha; \end{aligned} \right\} \quad (XI.1)$$

для схемы с треугольными поясными ячейками (рис. XI.1,в)

$$N_p = \pm 1,3 (0,866 M_x - 0,289 M_y) / h; \quad N_p = \mp 1,6 V a_1 / (n \sin \alpha), \quad (XI.1)$$

где h — высота плиты (расстояние между поясами); a — размер поясной ячейки; a_1 — расстояние между точками опирания стержневой системы вдоль стороны плиты; α — угол наклона раскосов к горизонтальной плоскости; n — число несущих раскосов в опорном узле; $M_{\max}$ — наибольший изгибающий момент; M_x и M_y — изгибающие моменты в единичной полосе сплошной плиты; 1,4; 1,75; 1,6 — поправочные коэффициенты, учитывающие различие между изгибающими моментами сплошной плиты и стержневой; 1,4; 1,75; 1,6 — поправочные коэффициенты, учитывающие различие между опорными реакциями в сплошной плите и стержневой; M_x , M_y — изгибающие моменты в единичной полосе сплошной плиты вдоль координатных осей x , y (рис. XI.39); V — опорная реакция единичной

полоски сплошной плиты; $N_p = \pm$ — сжимающее усилие при восходящих раскосах и растягивающее при нисходящих.

В перекрытии из решетчатых пирамид максимальные усилия в поясах N_n и опорных раскосах N_p составляют:

для плиты из пентаэдров (рис. XI.2,а):

$$N_n = \pm 2,1 \frac{M_{\max} a}{h}; \quad N_p = -1,6 \frac{V a_1}{2 \sin \alpha} = -\frac{0,8 V a_1}{\sin \alpha}; \quad (\text{XI.11})$$

для плиты из пентаэдров с диагональным расположением нижних поясов (рис. XI.2,б):

$$\left. \begin{aligned} N_n^B &= -2 \frac{M_{\max} a}{h}; \quad N_n^H = 2 \frac{M_{\max} a}{\sqrt{2} h} = \frac{1,414 M_{\max} a}{h}; \\ N_p &= -1,8 \frac{V a_1}{2 \sin \alpha} = \frac{0,9 V a_1}{\sin \alpha}; \end{aligned} \right\} \quad (\text{XI.12})$$

для плиты из тетраэдров (рис. XI. 2,в)—по формулам (XI.10);

для плиты из гексаэдров (рис. XI.2,г):

$$\left. \begin{aligned} N_n^B &= -1,5 \frac{(3M_x + M_y) a}{2h} = -\frac{0,75 (3M_x + M_y) a}{h}; \\ N_n^H &= -1,5 \frac{M_y a}{h}; \quad N_n^H = 1,5 \frac{(0,866 M_x - 0,289 M_y) a}{h}; \\ N_p &= -1,6 \frac{V a_1}{2 \sin \alpha} = -\frac{0,8 V a_1}{\sin \alpha}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{XI.13})$$

где N_n^B, N_n^H — усилия в верхних и нижних поясах соответственно [остальные обозначения те же, что и в формулах (XI.8)—(XI.10)].

В перекрытии, скомпонованном из решетчатых пирамид с вершинами, обращенными кверху, усилия определяют по формулам (XI.11) — (XI.13) с заменой N_n^B на N_n^H , N_n^H на N_n^B и знака «минус» на знак «плюс» для N_p (если опорные раскосы растянутые).

При опирании плиты на отдельные колонны усилия в опорных раскосах зависят от значения опорной реакции колонн V , числа несущих раскосов в опорном узле n и угла наклона их к горизонтальной плоскости α :

$$N_p \approx \mp V / (n \sin \alpha) = \mp A_{гр} p / (n \sin \alpha), \quad (\text{XI.14})$$

где $A_{гр}$ — площадь сбора нагрузок на одну колонну в предположении статической определимости плиты относительно опор; p — равномерно распределенная нагрузка на 1 м^2 перекрытия.

Усилия в раскосах решетчатых капителей колонн (рис. XI. 10,б; XI.11,а) определяются по формуле (XI.14) с подстановкой соответствующих данной капители значений n, α .

В мировой строительной практике пространственные покрытия в виде оболочек из металлических стержней получили очень широкое распространение, в связи с чем характеризуются многообразием форм и конструктивных решений. Число публикаций о сетчатых оболочках огромно, велики и организационные трудности, хотя бы простому просмотру различных книг и журналов. Кроме того, путем рассмотрения отдельных примеров возведения оболочек чрезвычайно трудно ознакомиться с возможностями и особенностями проектирования сетчатых конструкций покрытий, поскольку при таком подходе отсутствует ориентировочная основа процесса познания. Ниже предлагается систематизированное изложение материала, с методических позиций последовательно направляющее студента архитектурной специальности на изучение пространственных покрытий, чтобы при учебном и реальном проектировании он не просто повторял уже известные решения, а обладал основой для творческой деятельности.

Сетчатой оболочкой называют пространственную стержневую конструкцию, узлы которой находятся на поверхности оболочки. По геометрической форме сетчатые оболочки имеют поверхность одинарной или двоякой кривизны (одинарную кривизну иногда в литературе называют нулевой гауссовой кривизной). Сетчатые оболочки могут быть однополосными (однослойными) и двухполосными (двухслойными). Двухполосные оболочки представляют собой две жестко соединенные сетки. Их можно рассматривать как изогнутые по заданной поверхности перекрестно-стержневые конструкции. Однополосные сетчатые оболочки имеют более простое конструктивное решение, но перекрываемый ими пролет ограничен из-за возможности потери устойчивости. С точки зрения простоты возведения двухполосные оболочки могут оказываться более удобными.

§ XII.1. ФОРМЫ ОБОЛОЧЕК

Пространственные металлические решетчатые покрытия по форме поверхности в определенной мере аналогичны сплошным оболочкам, например железобетонным с поверхностью переноса и вращения. Из прямолинейных металлических стержней можно конструировать сетчатые своды, складки, цилиндрические оболочки, купола, пологие оболочки, гипары.

Сетчатые своды обладают весьма широкими возможностями для образования формы покрытия (рис. XI.1). Как видно из приведенных схем сводов, прежде всего при формообразовании требуется ограничение поверхности покрытия «естественными» сечениями. При таком подходе не изменяется в целом напряженное состояние оболочки и сохраняется минимальное число типоразмеров стержней и узлов. На основе отдельных форм сводов, например схем *e*, *ж*, *н* (рис. XII.41), возможны самые различные композиционные решения сводчатых покрытий, характеризующиеся

Рис. XII.1. Основные и возможные формы сетчатых сводов

а — цилиндрический свод; б — свод любой кривизны (из волн с линейчатой поверхностью однополостного гиперболоида вращения); в, г — складчатые своды; д — ж — примеры сводов с ограничением поверхности «естественными» сечениями; з — сетчатая конструкция; 1 — торцовая диафрагма; 2 — ограждение торца (несущая конструкция); 3 — стойки; 4 — подкосы

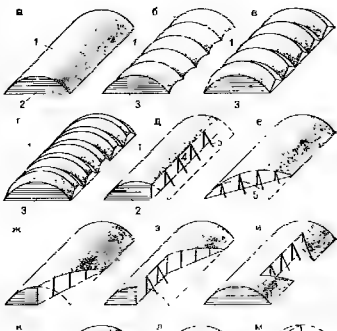
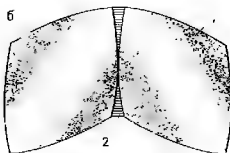
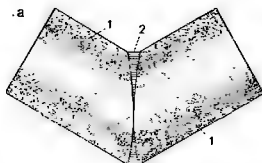
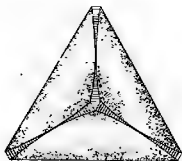


Рис. XII.2. Примеры компоновки формы оболочек из отдельных сетчатых сводов

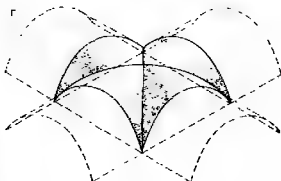
а, б, в — планы покрытий; г — схема образования крестового свода; 1 — кровля; 2 — верхний свет



в



г



индивидуальностью и архитектурной выразительностью. На рис. XII.2 приведено несколько примеров реализации такой возможности.

Основные формы складок стержневой конструкции (решетчатых складок) показаны на рис. XII.3. Складки с треугольным поперечным сечением (рис. XII.3,а) можно рассматривать как частный случай перекрестно-стержневой плиты, вытянутой вдоль

Рис. XII.3. Формы складчатых покрытий, типы сечений и консольных свесов складок

а, б — параллельные складки с треугольным поперечным сечением; *в, г* — то же, радиальные складки; *д* — возможные типы сечений складок; *е* — варианты консольных свесов складок; *1* — сетчатая конструкция; *2* — диафрагма (тяжка, рама и т. п.); *3* — бортовой элемент (в торцах здания)

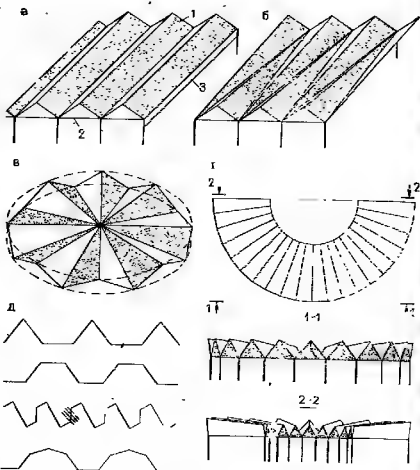
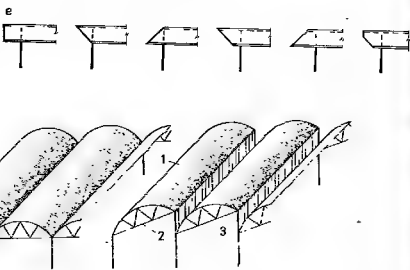


Рис. XII.4. Основные формы покрытий с сетчатыми цилиндрическими оболочками

1 — сетчатая конструкция; *2* — диафрагма (решетчатая или арочная); *3* — остекление



здания и работающей на изгиб только в коротком направлении (поясные стержни в такой плите вдоль здания не нужны, поэтому они и исключены). Независимо от очертания плана покрытия складки могут иметь консольные свесы (рис. XII.3, *е*), а также наклонное положение вдоль перекрываемого пролета. При прямоугольном плане низ покрытия по ряду колонн завершается тяжелой, которая в принципе может быть заменена любым другим элементом, способным воспринимать распор (например, рамой повторяющей профиль складки, подстропильной конструкцией)

Рис. XII.5. Характерные формы купольных покрытий стержневой конструкции (вид сбоку и план)

а — сферический купол с круглым планом; *б* — то же, с многоугольным; *в* — купол с вытянутым планом; *г* — сферический купол с поверхностью многогранника (граненый); *д* — сочлененный купол; *е* — складчатый купол

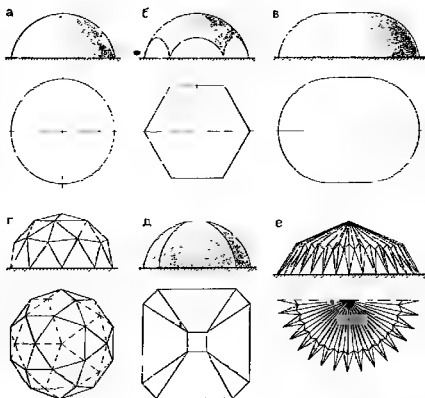


Рис. XII.6. Варианты расположения купола относительно поверхности земли
а, б — горизонтальное расположение; *в* — наклонное

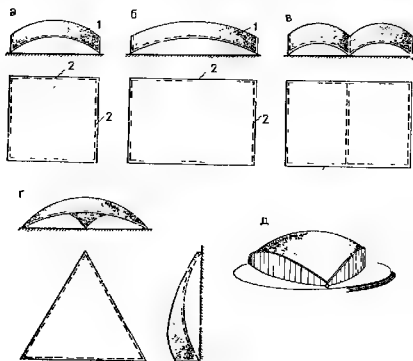
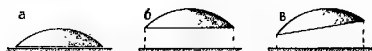


Рис. XII.7. Формы покрытий с применением сетчатых плоских оболочек

а — оболочка с квадратным планом; *б, в* — одно- и многоволновые оболочки при прямоугольном плане сооружения; *г, д* — проекции и общий вид оболочки с треугольным планом; *1* — сетчатая конструкция; *2* — диафрагма

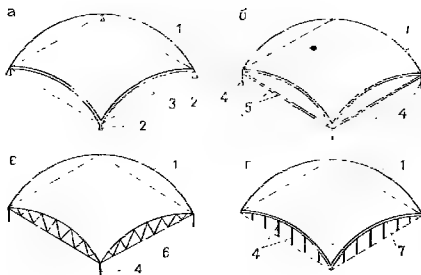


Рис. XII.8. Типы покрытых оболочек по конструкции опорных дм. фрагм

а — покрытие с контурными ребрами; б — те же, арками; в — то же, фермами; г — то же, криволинейными брусьями, опертными на колонны; 1 — плита оболочки (решетчатая система); 2 — фундамент; 3 — контурное ребро; 4 — колонны; 5 — контурная арка; 6 — контурная ферма; 7 — криволинейный брус

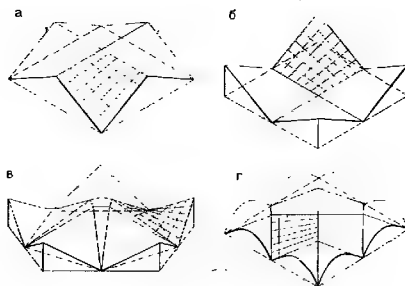


Рис. XII.9. Пример компоновки сетчатых покрытий из нескольких лепестков гиперболического параболоида

а, б — четырехлепестковые гипары; в — пятилепестковый гипар; г — многолепестковый

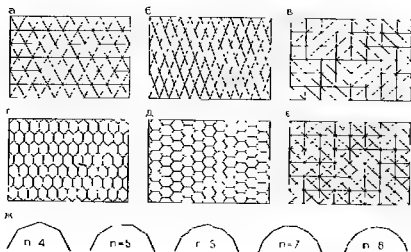


Рис. XII.10. Схемы сеток для поверхности сводчатых оболочек

а — из равносторонних треугольников; б — из ромбов; в — с квадратными ячейками и раскосами; г, д — с шестигранными (гексагональными) ячейками; е — с квадратными ячейками и крестовыми раскосами; ж — влияние числа стержней n в дуге n на математический профиль поперечного сечения свода

Формы сетчатых цилиндрических оболочек приведены на рис. XII.4. Некоторое разнообразие их достигается путем устройства консольных свесов, как рекомендуется для складок на рис. XII.3,е.

Из оболочек двоякой кривизны при одинаковой стреле подъема и одинаковой перекрываемой площади купол обладает минимальной поверхностью. Формы сетчатых куполов весьма разнообразны, например конические, эллиптические, однако чаще всего их назначают сферическими. Между собой сферические купола отличаются очертанием плана и стрелой подъема. На рис. XII.5 отражены основные формы сферических куполов. Кроме ровной поверхности купольные покрытия могут иметь вид различных четко выраженных многогранников или складчатых конструкций (рис. XII.5,з, е). Сочлененный купол образуется несколькими секторами, вырезанными из оболочки с цилиндрической поверхностью (рис. XII.5,д). Обычно опорное кольцо купола горизонтально, но для него возможно и наклонное положение (рис. XII.6,в), о чем следует помнить при создании архитектурного образа сооружения.

Сетчатые пологие оболочки менее разнообразны по своей форме, чем другие пространственные покрытия (рис. XII.7). При квадратном и треугольном планах пологую оболочку можно рассматривать как частный случай купола (рис. XII.7,а, з). При прямоугольном плане пологие оболочки выполняют одноволюновыми или многоволюновыми (рис. XII.7,б, в). Относительно поверхности земли пологие оболочки располагают непосредственно на фундаментах или на колоннах по углам сооружения, что аналогично схемам на рис. XII.6.

По контуру пологие оболочки опираются на диафрагмы в виде ферм, арок, контурных ребер, криволинейных брусьев (рис. XII.8). При опирании на фундаменты или пилоны целесообразно применять контурные ребра (рис. XII.8,а), в этом случае можно расширять здания в будущем. Арки и фермы рекомендуется применять при опирании покрытия по углам на четыре колонны (рис. XII.8, б, в). Криволинейные брусья обычно используют при частом расположении колонн по периметру здания (рис. XII.8,з).

Оболочки с поверхностью гиперболического параболоида сокращенно называют гипарами. Они имеют весьма широкие возможности по формообразованию покрытий из сеток с прямолинейными стержнями. На рис. XII.9 приведено только несколько вариантов форм покрытий в виде гипаров. По углам сооружения гипары обычно опирают или непосредственно на фундаменты, или на колонны. При опирании на колонны концы лепестков гипара соединяют затяжками для восприятия распора (в соответствии с напряженным состоянием покрытия, что изложено ниже в разделе расчетов). Недостатком гипаров, в определенной степени сдерживающим их широкое распространение, является завышение объема большепролетного сооружения в углах или коньковой части покрытия.

Поверхность сетчатых оболочек одинарной кривизны, например сводов, складок и цилиндрических оболочек, образуется соответствующим изгибом плоской сетки с одинаковыми ячейками. На рис. XII.10, XII.11, XII.13 приведены схемы различных сеток для устройства таких покрытий.

Для образования поверхности сводчатых покрытий используют сетки с различными ячейками, например треугольными, ромбическими, шестиугольными, квадратными с раскосами (рис. XII.10). Наиболее жесткими являются своды с сетками из треугольных ячеек и квадратных с раскосами (схемы *а, в, г* на рис. XII.10). Покрытия с ромбическими и шестиугольными ячейками более деформативны, но помогают добиться архитектурной выразительности поверхности оболочки.

Очертание поперечного сечения свода легко варьируется длиной стержня в ячейке сетки. Складчатые своды образуют изгибом сетки в двух направлениях, как показано на рис. XII.11. Чем больше стержней назначают вдоль дуги свода, тем более дробным оказывается призматический профиль поперечного сечения покрытия (рис. XII.10, *ж*), но при этом увеличивается число узлов и возрастает деформативность конструкции в целом.

Складчатый свод с сеткой из перегнутых ромбов с шарнирными узлами (рис. XII.11, *б*) можно трансформировать вдоль здания, т. е. сдвигать и раздвигать. Однако в этом случае пролет свода не будет постоянным; при складировании покрытия он будет уменьшаться, а при раздвижке — увеличиваться. Постоянство перекрываемого пролета обеспечивается, если сетчатый свод предусмотреть в виде конструкции из ромбов, перегнутых по короткой диагонали и ориентированных длинной диагональю вдоль дуги покрытия (рис. XII.12). В таком своде противоположные стержни ромбов нужно попарно соединять распорками, расположенными по прямолинейным образующим гиперболического параболоида.

Для краев складчатых покрытий применяют различные сетки с геометрически неизменяемыми ячейками (рис. XII.13). Сетки с неполным заполнением квадратных ячеек можно использовать для уменьшения длины раскосов. Складки с раскосами, ориентированными вдоль граней по растянутой или сжатой дуге (рис. XII.13, *д*), имеют четкую статическую схему.

Для образования поверхности цилиндрических оболочек приемлемы сетки сводов только с геометрически неизменяемой ячейкой, что необходимо из условия обеспечения работы покрытия под нагрузкой (рис. XII.10, *а, в, е*).

Для построения сетчатой поверхности куполов разработано много различных способов. Наиболее характерные из них приведены на рис. XII.14. Самой ранней геометрией поверхности купола являются схемы *а, б* — они известны с прошлого века. Расстояния между кольцами в этих схемах принимают одинаковыми. Диагональные связи в четырехугольных ячейках обеспечивают пространственный характер работы купола. Позднее были предложены

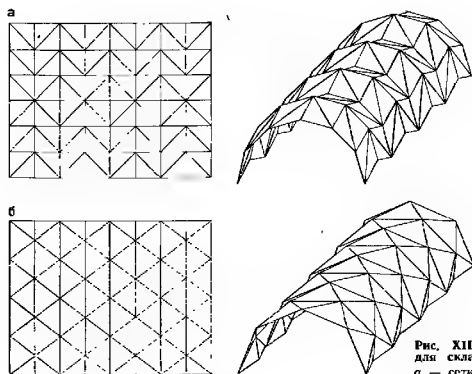


Рис. XII.11. Схемы сеток для складчатых сводов

а — сетка из квадратных ячеек с раскосами и складчатый свод из нее; б — сетка из ромбов и свод из нее

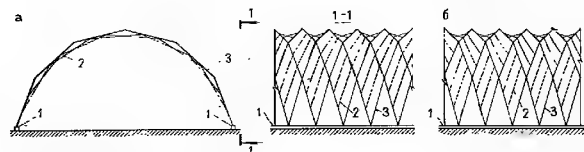


Рис. XII.12. Схема трансформируемого сетчатого свода с постоянным размером пролета
а — поперечный разрез и фрагмент поверхности (вид сбоку); б — вариант сочленения ромбов с распорками; 1 — направляющие вдоль здания; 2 — распорки; 3 — основные стержни свода

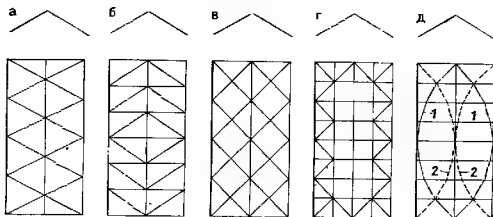


Рис. XII.13. Схемы сеток для складчатых покрытий

а — с треугольными ячейками; б — с раскосами; в — с двойными раскосами (крестовая); г — с неполным заполнением раскосами квадратных ячеек; д — со встроеными арками, 1 — растянутые арки; 2 — сжатые арки

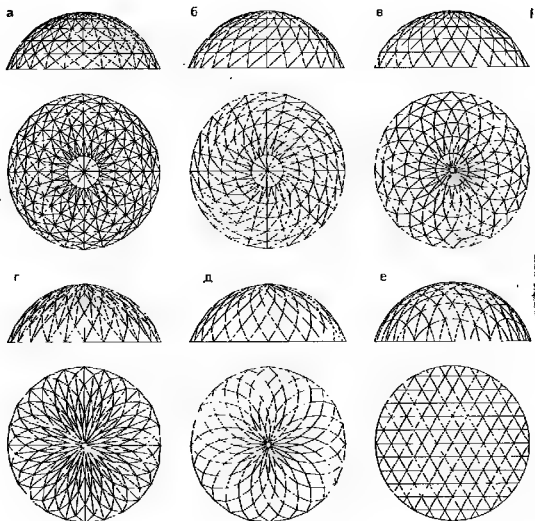


Рис. XII.14. Примеры сеток на поверхности сферического купола

а, б — радиально-кольцевые схемы; в, г — звездчатые схемы; д — меридионально-перекрещивающаяся (ромбическая) схема; е — арочная схема

другие схемы, придающие поверхности купола разнообразие и архитектурную выразительность.

В звездчатой схеме (рис. XII.14,в) все меридиональные стержни имеют одинаковую длину, длина стержней в кольцевом направлении уменьшается кверху от яруса к ярусу. В меридионально-перекрещивающейся схеме (рис. XII.14,д) длина всех стержней постоянная. Они образуют сетку ромбических ячеек, называемую правильной сетью Чебышева. Если в такой сетке вершины ромбов соединить стержнями, ориентированными по меридианам, то получится звездчатая схема (рис. XII.14,г), придающая поверхности купола складчатый характер. Арочная схема построения сетчатого купола состоит в проецировании плоской сетки из равносторонних треугольников на сферическую поверхность (рис. XII.14,е). Приведенные на рис. XII.14 схемы а—д образования сеток можно использовать не только для сферических куполов, но и для куполов с любой поверхностью вращения.

Интересные сетки стержней получаются при применении геодезических куполов, разработанных Фуллером в США и М. С. Тупо-

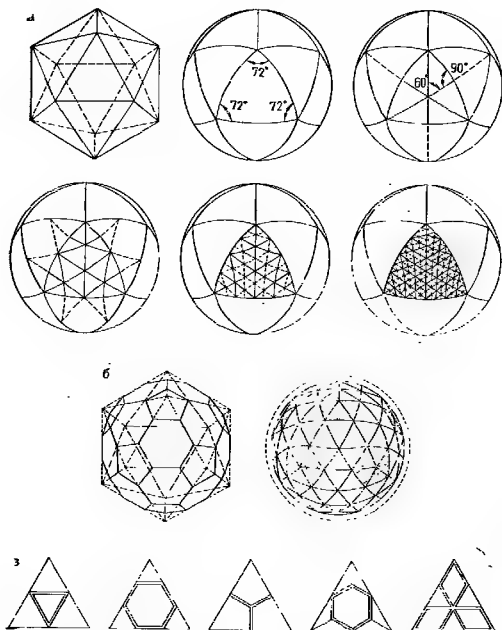


Рис. XII.15. Схемы образования поверхности геодезических куполов

a — принцип последовательной разбивки сетки на сфере через 20 гранник (Фуллер, США);
б — принцип разбивки сетки через 32-гранник (М. С. Туполев, СССР); *в* — варианты заполнения сферических треугольников

левым в Московском архитектурном институте¹. В основу геометрии геодезического купола положено семейство линий, разбивающих поверхность сферы на равные части. На рис. XII.15 показаны принципы построения геодезического купола, начиная от простого икосаэдра, состоящего из 20 равносторонних треугольников. Суть первого способа заключается в описывании икосаэдра сферой и последующем дроблении 20 одинаковых сферических треугольников (рис. XII.15, *a*). Второй прием состоит в обрезании 12 вершин икосаэдра с таким расчетом, чтобы получить тридцатидвугранник из 20 правильных шестиугольников и 12 правильных пятиугольни-

¹ М. С. Туполев эти купола называл «кристаллическими». В литературе закрепился вариант названия «геодезические».

ков с одинаковым размером грани; затем над плоскими гранями надстраивают пирамиды, вписанные в сферу (рис. XII.15,б).

Икосаэдр с размером стороны треугольника a описывается сферой с радиусом $R=0.9510564a$. Размеры сторон сферических треугольников при различном дроблении сетки приведены в [34, с. 327—328]. Заполнение сферических равносторонних треугольников может быть различным (рис. XII.15,в), соответственно внешний вид поверхности купола и образ сооружения в целом получают различное эстетическое звучание.

Для образования поверхности пологих оболочек рекомендуется использовать сетки с квадратными или треугольными ячейками, какие показаны для сводов на рис. XII.10,а,в. В отличие от сводов, поверхность которых образуют путем изгиба плоской сетки, пологие оболочки получают проецированием плоских сеток на заданную криволинейную поверхность.

§ XII.3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО УСТОЙЧИВОСТИ СЕТЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК

Однопоясные сетчатые оболочки конструируют как статически неопределимые стержневые системы, иначе общая жесткость покрытия не будет обеспечиваться. На рис. XII.16 проблема устойчивости оболочки иллюстрируется схемой прощелкивания узла. Для обеспечения устойчивости однопоясных сетчатых систем необходимы узлы с жестким соединением стержней в направлении нормали к поверхности оболочки. Таким требованиям отвечают конструкции узлов в уже известных по структурным плитам системах «ИФИ», «Триодетик», «Октаплатте», «ЦНИЙСК».

Прощелкивания жестких узлов в сетчатых оболочках не будет, если соблюдать условие (согласно исследованиям Райта [42])

$$a^2/(R i) < 9, \quad (\text{XII.1})$$

где a — длина стержня (размер ячейки); R — радиус кривизны оболочки; i — радиус инерции поперечного сечения стержня.

В двухпоясных оболочках устойчивость системы стержней обеспечивают не жесткостью узлов, а геометрической неизменяемостью конструкции в целом (рис. XII.17). В узлах таких покрытий возможно любое соединение стержней.

При сравнительно небольших пролетах устойчивость сетчатой оболочки можно обеспечивать только за счет жесткости узлов. Для перекрытия значительных пролетов требуется применять двухпоясную стержневую конструкцию. Четкой границы перехода от однопоясных сетчатых оболочек к двухпоясным нет, так как устойчивость покрытия зависит от ряда факторов, в частности от формы оболочки, очертания и размеров ячейки сетки, материала и сечения стержней, значения нагрузок. В каждом конкретном случае вопрос устойчивости оболочки разрешают путем расчетов. В практике строительства однопоясных сетчатых оболочек перекрываемый пролет ограничивается 60—75 м. При двухпоясных покрытиях пролет сооружения может достигать 600 м.

Помимо жестких узлов для обеспечения геометрической неиз-

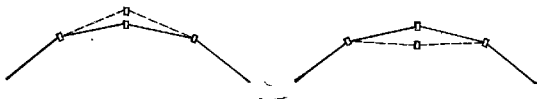


Рис. XII.16. Схемы прощелкивания однослойной сетчатой оболочки при недостаточной жесткости узла в направлении нормали к поверхности

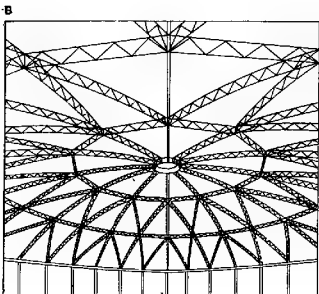
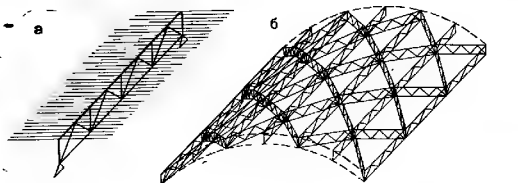


Рис. XII.17. Использование принципа геометрической неизменяемости ферм

а — в обычном стропильном покрытии; б, в — в пространственных покрытиях

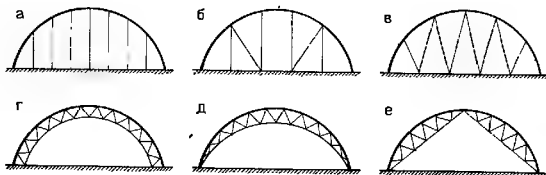


Рис. XII.18. Конструкции торцов однополюсных сетчатых сводов

а — с вертикальными стойками; б — с вертикальными стойками и раскосами; в — с наклонными стойками; г, д — с двухшарнирными арками; е — с трехшарнирной аркой

меняемости сетчатых однопоясных сводов предусматривают жесткую конструкцию торцов оболочки. Основные варианты конструктивных решений торцов сводчатых покрытий отражены на рис. XII.18. Конструкцию торца оболочки выбирают при архитектурном решении сооружения.

Для обеспечения устойчивости однопоясных цилиндрических оболочек используют промежуточные диафрагмы в виде криволинейных ребер с высотой поперечного сечения примерно $\frac{1}{40}$ ширины волны оболочки. Вдоль оболочки ребра устанавливаются с шагом 1—1,5 ширины волны. Устойчивость крайних складок в торцах покрытия обеспечивают бортовыми элементами или промежуточными диафрагмами, которые устанавливают с шагом 2—2,5 ширины складки. Сетчатые пологие оболочки подкрепляют по контуру диафрагмами. Высоту поперечного сечения контурных ребер и арок назначают примерно $\frac{1}{60}$ пролета. Устойчивость сетчатых гипаров обеспечивают бортовыми элементами. Горизонтальный размер сечения наклонных и коньковых ребер ориентировочно принимают $\frac{1}{60}$ — $\frac{1}{80}$ пролета, вертикальный — вдвое меньше.

§ XII.4. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ОДНОПОЯСНЫХ ОБОЛОЧЕК

Конструкция узлов однопоясных сетчатых оболочек зависит в первую очередь от напряженного состояния покрытия, условий возведения сооружения и возможностей изготовления элементов на заводе. Форма покрытия и геометрия сетки поверхности практически не определяют применение какого-либо узлового соединения.

Конструирование узловых соединений однопоясных оболочек несколько облегчается тем обстоятельством, что стержни в узлах сеток сходятся под одинаковыми углами к нормали поверхности. Необходимое жесткое соединение стержней из плоскости оболочки в узлах сетки обеспечивают применением известных по перекрестно-стержневым плитам узловых решений «ИФИ», «Триодетик» (рис. XI.13), «ЦНИИСК», «Октаплатте» (рис. XI.18), которые частично упрощаются за счет отсутствия раскосов. На рис. XII.19 приведены характерные примеры сетчатых оболочек с подобным использованием узловых соединений. Трубчатые стержни сводчатого покрытия пролетом 18 м соединены узлами SDC*, в покрытие из гиперболических параболоидов с общим квадратным планом $40,23 \times 40,23$ — узлами «Триодетик».

Специально для соединения стержней в однопоясных оболочках разработаны и применяют следующие конструктивные решения узлов. Трубчатые стержни в сводчатом покрытии могут стыковаться с использованием уголковых профилей, как изображено на рис. XII.20. Такая конструкция стыков применена при перекрытии спортивного зала пролетом 60 м в Кладно (ЧССР). При очертании свода по дуге окружности обрамление уголками торцов стержней

* Узел SDC («Эс-дю-Шато») отличается от узла «Октаплатте» тем, что вместо полого шара с отверстиями применен сплюсненной формы пустотелый элемент, образованный из двух литых половинок.

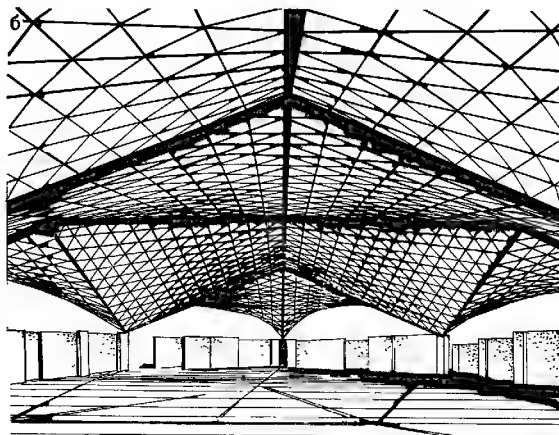
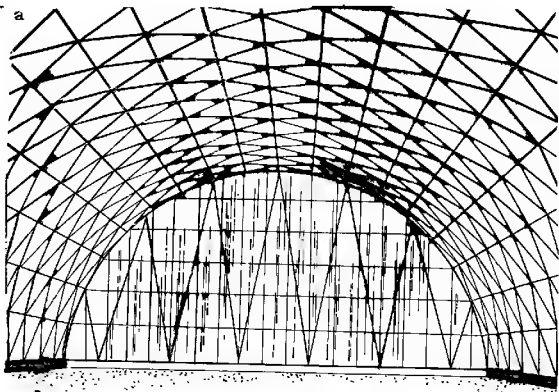


Рис. XII.19. Примеры введенных одноповерхностных сетчатых оболочек
 а — теннисный корт в Париже; б — производственное здание в Мехико

§ XII.5. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДВУХПОСОСНЫХ ОБОЛОЧЕК

К узлам двухпососных покрытий не предъявляют требования жесткого соединения стержней. В этой связи при конструировании двухпососных оболочек можно применять любые узловые соединения, известные для стержневых плит.

годин и для однопососных покрытий (рис. XII.23).

пространственных стержневых систем, отдельные из которых при стнтутом предложено ряд соединений с фасонными деталями для ется. Например, только Казанским инженерно-строительным ин-совершенствуются, поиск новых вариантов соединений продолжается. Конструктивные решения узлов сетчатых оболочек постоянно воспринимают сжимающих и растягивающих усилий.

ций. Болтовое соединение стержней в узле обеспечивает надежное стрякини Филлера, звездчатые соединения — различных конструк- (рис. XII.22). Тарельчатые соединения при этом применяют кон- ными деталями в виде штампованных тарелок или литых звезд обеспечивают при использовании болтовых соединений с фасон- Удобство и скорость монтажа однослойных сетчатых куполов работ по возведению сетчатой оболочки.

ная сварка узлов отрицательно сказывается на трудоемкости буются очень точное изготовление стержней. Кроме того, монтаж к ортогональному. При простоте конструкции врезного узла тре- емлем для сетчатых оболочек при пересечении стержней близким во врезном узле, как показано на рис. XII.21, а. Такой узел при- Надежное соединение стержней из квадратных труб получают для полонных куполов, поскольку в них все стержни сжаты.

ными ячейками. Применение системы «Абстракт» целесообразно может быть и шестигранной для сетчатых оболочек с треуголь- изменяемости конструкции (рис. XII.21, б). В принципе крестовинная При простоте узлового соединения достигают геометрической не- лин для сетчатых оболочек с ячейками, близкими к квадратным. сплавов обеспечивает система «Абстракт», разработанная в Ант- Жесткое соединение сжатых стержней из стали и алюминиевых или лиг монтажная сварка.

ления растянутых стержней может потребоваться мощный болт Узел хорошо воспринимает только сжимающие усилия. Для креп- ной, ей можно придавать практически любую нужную форму. болт. Фасонная деталь не обязательно должна быть шестигран- простую листовую диафрагму и простой конструкции стяжной покрытий. Стержни открытого профиля позволяют применять ром Вупперман» (рис. XII.21, а). Эти узлы разработаны Теодо- Для соединения стержней открытого профиля применяют узлы по возведению покрытий.

Применение монтажной сварки увеличивает трудоемкость работ стержней, после чего стыки углов обваривают по периметру. менстов. При монтаже свода сначала собирают на болтах сетку отличается простотой подготовки изготовления единичности эле-

Наиболее простое решение двухпосочного покрытия получают при использовании элементов в виде плоских ферм, имеющих параллельные пояса и образующих при пересечении треугольные или ромбические ячейки, как показано в качестве примеров на рис. XII.17, 6, в.

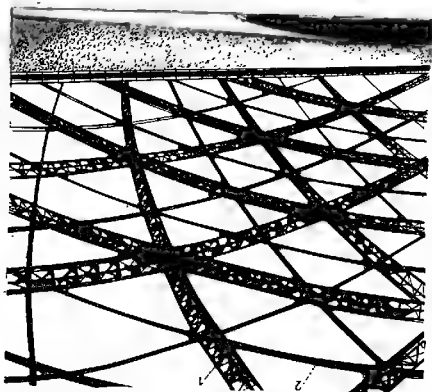
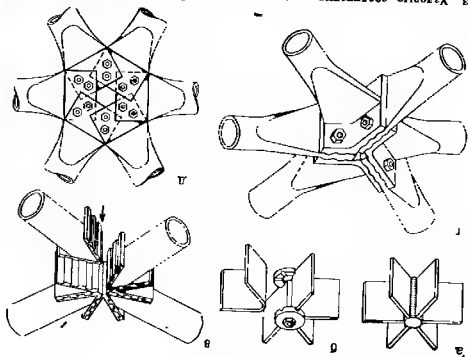


Рис. XII.34. Двухпосочное покрытие с плоскими фермами из распорных стержней (образуют новую сеть опорных стержней) (проект Кривоногов)

Рис. XII.23. Узловые соединения, предложенные Казанским инженерно-строительным институтом

а — флансовая деталь с цилиндрическим вкладышем; б — то же, с V-образными косынками; в — то же, типа «ласточный хвост»; г — то же, с угловыми косынками, имеющими торцовые вырезы; д — соединительные вставки; е — плоские концы стержней



Кровельному ограждению сетчатых обочек приписали два характерных свойства: однородность элементов и многообразие конструктивных решений в целом.

§ XII.6. УСТРОЙСТВО КРОВЛИ ПО ОБОЛОЧКАМ

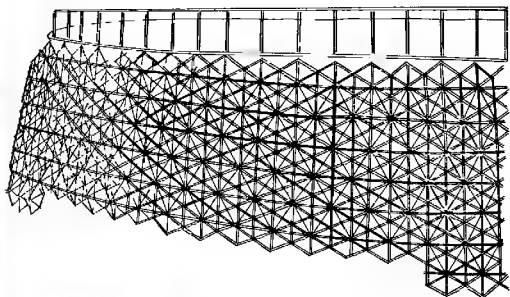
Дальнейшим развитием конструкции двуххребтового покрытия является применение пространственных стержней, имеющих, как правило, трехгранное поперечное сечение. Пример купола подобной конструкции приведен на рис. XII.24.

К новому принципу конструирования большепролетного покрытия относится использование двух слоев стержневых сеток, между которыми расположены раскосы. Такую оболочку можно представлять как стержневую плиту, изогнутую по заданной поверхности. Двуххребтовую оболочку по этому техническому решению монтируют только совместно с использованием строительных лесов. На рис. XII.25 показана конструкция оболочек, возводимой наиболее трудоемким методом крупнооблочного монтажа. Использование разъемной узловой детали позволяет стержневой каркас оболочки раскладывать на треугольные пространственные блоки, которые в свою очередь могут быть объединены в более крупные монтажные блоки по два, три, четыре и более треугольных блока в каждом в зависимости от треугольности монтажных краев. Данное конструктивное решение двуххребтовой оболочки разработано в ЦНИИ строительных металлоконструкций.

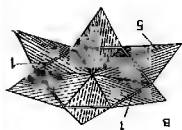
Большой вклад в разработку и введение двуххребтовых куполов внес американский инженер Филлер. Он предложил и осуществил в натуре несколько вариантов двуххребтовых сетчатых куполов (рис. XII.26, XII.27). Отличительной особенностью куполов системы Филлера является простота монтажа (рис. XII.26, с). С куполом системы Филлера можно ознакомиться в Москве — это выставочный павильон в Сокольниках. Купол возведен в 1959 г., его диаметр 60,9 м, высота 19,8 м.

Интересным примером покрытия со съезными стержнями является четыреххребтовый купол, которым перекрыт спортивный зал «Ота Ворд» в Японии (рис. XII.28). Размер покрытия в плане 53×53 м, высота до коньковых ребер 18 м. Бортовые элементы и коньковые ребра купола выполнены из монолитного железобетона. Стержни, орнитированные вдоль прямолинейных образующих, состоят из двух прокатных углов $50 \times 50 \times 6$ мм, диагональные стержни — из четырех углов $65 \times 65 \times 6$ и $75 \times 75 \times 6$ мм. Высота сечения всех стержней 300 мм. По решетке обочек уложены стальные пролеты с шагом 60 см и легкая утепленная кровля.

Определенный интерес в композиционном решении большепролетного покрытия представляет возможность соединения двухпокрытий сетчатых куполов. На рис. XII.29 показано покрытие для разрабатываемого Свердловским архитектурным институтом для тризового причала в Олесском морском порту и представляющее собой сопряженные в единую конструктивную систему три купольные чаши диаметром 100 м.

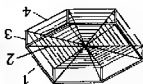


1



5

1

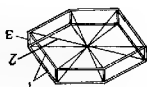


4

3

2

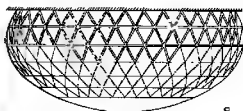
1



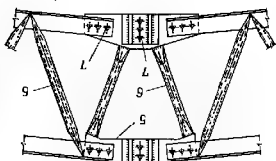
3

2

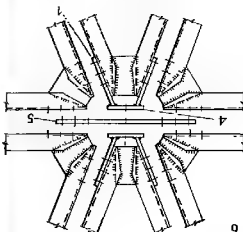
1



5



1-1



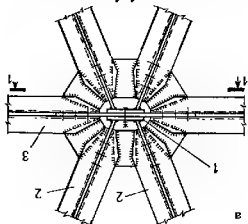
5

4

3

2

1



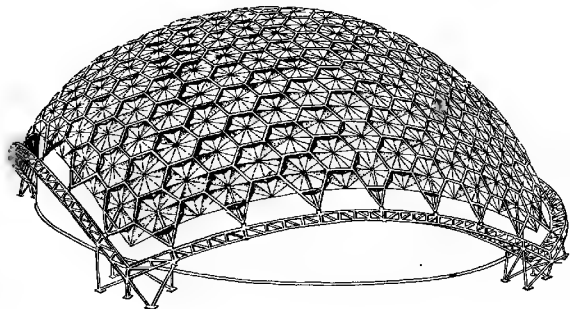
5

4

3

2

1



25 | 27
26 |

Рис. XII.25. Узловое соединение стержней для двухполюсной оболочки при крупноблочном монтаже (предложение ЦНИИ строительных металлоконструкций)

а — конструкция узла (план и разрез); *б* — условное расчленение узла на составляющие части; *в* — расчленение каркаса оболочки на треугольные пространственные блоки; 1 — фасонки; 2 — меридиональные стержни; 3 — то же, кольцевые стержни; 4 — прямоугольные фланцы; 5 — центральная фасонка; 6 — раскосы из труб со сплюснутыми концами; 7 — болты

Рис. XII.26. Схемы конструктивных решений двухполюсных куполов системы Фуллера (США)

а, б — варианты шестиугольных ячеек; *в* — использование ромбических листов с трубчатой распоркой; *г* — монтаж купола; 1 — трубчатые стержни; 2 — гибкие стержни (растяжки); 3 — стойки; 4 — металлический лист; 5 — гнутый ромбический лист из металла

Рис. XII.27. Общий вид купола из гнутых ромбических листов



Рис. XII.28. Общий вид здания с гиперболическим покрытием из сквозных металлических стержней (спортивный зал «Ога Уорд» в Японии)

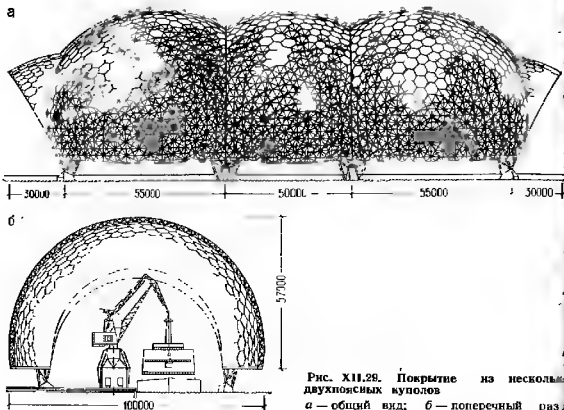


Рис. XII.29. Покрытие из нескольких двухполусферических куполов
а — общий вид; б — поперечный разрез

Кровля может быть непрозрачной, прозрачной и с отдельными прозрачными участками. Наибольшее распространение в практике строительства получила непрозрачная кровля. Ее выполняют различных вариантах, суть которых сводится к применению: ошивки из оцинкованной волнистой или профилированной стали, плоских или профилированных алюминиевых, полиэфирных, стеклопластиковых или асбестоцементных листов по обрешетке с утелителем или без него; однослойных или трехслойных алюминиевых панелей с заполнением стыков ленточными герметиками, обычного рулонного ковра со утеплителем, уложенному на любой настил.

Для прозрачной холодной кровли, как правило, используют волнистый полиэфирный стеклопластик, органическое (акриловое) стекло, армированное стекло или светопрозрачную синтетическую ткань. Для отапливаемых помещений применяют светопрозрачные панели из стеклопластика, средний слой которых может быть различным в виде сот из плоских ребер, сот из волнистых листов, поставленных вертикально, сот из труб, волнистых листов, уложенных горизонтально. Решение покрытия с прозрачной кровлей позволяет архитектору подчеркивать легкость сооружения и получать интересные интерьеры.

При проектировании большепролетного покрытия со светопрозрачной кровлей из синтетических материалов необходимо предусматривать специальные мероприятия, предупреждающие возможные нарушения настила из-за большого различия в коэффициентах линейного расширения пластмасс и металлов (рис. XII.30). В случае точечного опирания листы из оргстекла

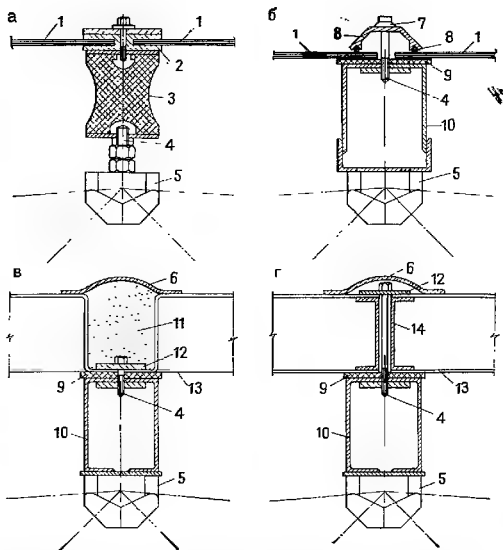


Рис. XII.30. Примеры устройства кровли из светопрозрачных листов и панелей
 а — плавающее крепление одинарного остекления; б — одинарное остекление с использованием нащельников; в, г — варианты применения трехслойных панелей; 1 — листы оргстекла или армированного силикатного стекла; 2 — обрамление профилем из алюминиевого сплава; 3 — амортизатор из неопрена (синтетического каучука); 4 — соединительный (крепежный) болт; 5 — фасонный элемент узла оболочки; 6 — нащельник из алюминиевого сплава, нержавеющей стали, меди, стеклопластика; 7 — пластмассовый колпачок на гайке; 8 — прокладка из неопренового жгута; 9 — упругая прокладка; 10 — пенопласт, минеральная вата; 12 — накладка; 13 — светопрозрачная трехслойная стеклопластиковая панель; 14 — обрамление из профильного стеклопластика

обрамляют алюминиевым профилем и крепят к амортизаторам из синтетического каучука (неопрена), как показано на рис. XII.30, а. При контурном опирании листов на прогоны применяют различные нащельники из алюминиевого сплава, нержавеющей стали, стеклопластика (рис. XII.30, б). Крепление листов, обеспечивающее небольшие перемещения их при неравномерных деформациях по отношению к сетчатой несущей конструкции, называют плавающим. На рис. XII.30, в, г показано применение стеклопластиковых панелей, крепление которых также является податливым. Из практики возведения пространственных покрытий известны случаи жесткого крепления светопрозрачного настила к прогонам, но тогда крепление прогонов к несущей конструкции решается плавающим, например путем использования балансирного устройства.

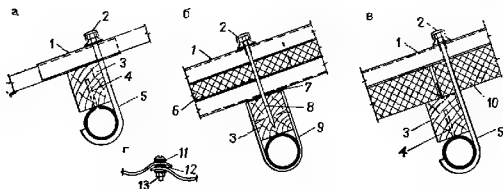


Рис. XII.31. Примеры устройства кровельного ограждения по деревянной обрешетке сетчатой оболочки

а — холодная кровля; б, в — теплые кровельные ограждения; 2 — поперечный стык стеклопластиковых листов; 1 — профилированный стальной, алюминиевый или стеклопластиковый лист; 2 — пластмассовый колачок; 3 — деревянная обрешетка; 4 — стальной штырь; 5 — оцинкованный стальной крюк; 6 — полистирольный или полиуретановый пенопласт; 7 — прокладка из пластифицированной пластмассы; 8 — оцинкованный стальной глухарь; 9 — хомут из стальной полосы; 10 — трехслойная теплоизоляционная плита с алюминиевой обшивкой; 11 — шайба с эластичной прокладкой; 12 — ленточный герметик; 13 — оцинкованный стяжной болт

Обрешетку под кровлю можно устраивать металлической или деревянной. Металлическую обрешетку выполняют из прокатных или гнутых профилей, а также из прессованных алюминиевых профилей без принципиального отличия от устройства прогона по перекрестно-стержневым плитам (см. рис. XI.25). Примеры кровельного ограждения с деревянной обрешеткой приведены на рис. XII.31. К стержням оболочки деревянную обрешетку крепят с помощью стальных крюков или хомутов из стальной полосы.

В качестве утеплителя для кровельного ограждения сетчатых оболочек используют материалы с малой плотностью, например минераловатные плиты, полистирольный или полиуретановый плитный пенопласт (рис. XII.31, б, в). При устройстве кровли из алюминиевых или пластмассовых листов стыки заполняют уплотнительными прокладками или мастками для надежной гидроизоляции (рис. XII.31, г).

§ XII.7. РАСЧЕТ УСИЛИЙ В СВОДЕ

Расчет сводчатого покрытия рекомендуется начинать с вычисления основных геометрических характеристик покрытия на основе исходных значений пролета l и стрелы подъема f — радиуса кривизны свода R , центрального угла от конька до опоры свода φ_0 и длины дуги свода L :

$$R = (l^2 + 4f^2)/(8f); \quad \varphi_0 = \arcsin [l/(2R)]; \quad L = \pi R \varphi_0/90^\circ. \quad (\text{XII.1})$$

При подсчете постоянной нагрузки g нормативное значение составляющей от собственной массы сетчатой конструкции, N/m свода можно принимать по эмпирической зависимости:

$$g_{с.м} = \Omega l, \quad (\text{XII.2})$$

где Ω — коэффициент расхода металла (для стальных сводов $\Omega = 6-10$, для алюминиевых сводов $\Omega = 3-5$); l — перекрываемый пролет, м.

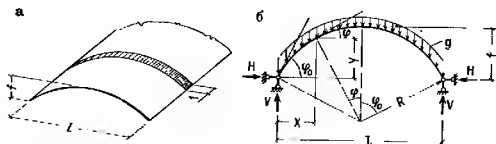


Рис. XII.32. Расчетная схема свода при действии постоянной нагрузки
 а — единичная полоска свода при определении нагрузок и усилий; б — действие постоянной нагрузки

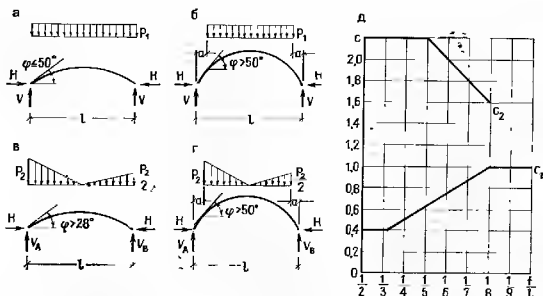


Рис. XII.33. Снеговая нагрузка на сводчатое покрытие
 а, б — равномерно распределенная нагрузка от снега (вариант 1); в, г — треугольная снеговая нагрузка (вариант 2); д — графики коэффициентов C_1 и C_2 , учитывающие снеговую нагрузку на своде

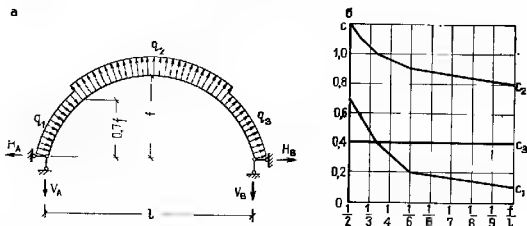


Рис. XII.34. Ветровая нагрузка на сводчатое покрытие
 а — расчетная схема; б — графики аэродинамических коэффициентов свода

Действие на сводчатое покрытие постоянной нагрузки от собственной массы кровли и несущей конструкции показано на рис. XII.32. Расчетную снеговую нагрузку на свод принимают по двум вариантам: равномерно распределенной и треугольной

(рис. XII.33). Нагрузку от снега определяют в соответствии указаниями СНиП II-6-74 [50]:

$$p_1 = p_0 c_1 n; \quad p_2 = p_0 c_2 n, \quad (\text{XII.5})$$

где p_0 — нагрузка от снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли; принимают в зависимости от снегового района СССР; c_1, c_2 — коэффициенты, учитывающие переход от снега на земле к снеговой нагрузке на сводчатое покрытие (рис. XII.33, б); n — коэффициент перегрузки; его определяют в зависимости от отношения снеговой нагрузки g^n к нормативной снеговой нагрузке p_0 ($n=1,4$ при $g^n/p_0 \geq 1$; $n=1,5$ при $g^n/p_0 = 0,8$; $n=1,55$ при $g^n/p_0 = 0,7$; $n=1,6$ при $g^n/p_0 \leq 0,4$).

На рис. XII.34 показано действие ветрового напора на свод. Расчетное значение ветровой нагрузки определяют по формулам

$$q_1 = q_0 c_1 n K; \quad q_2 = q_0 c_2 n K; \quad q_3 = q_0 c_3 n K, \quad (\text{XII.6})$$

где q_0 — скоростной напор; его принимают в соответствии со СНиП [50]; c_1, c_2, c_3 — аэродинамические коэффициенты; принимают по графикам на рис. XII.34, б; n — коэффициент перегрузки, равный 1,2; K — коэффициент, учитывающий изменение скоростного напора в зависимости от высоты свода и типа местности; принимают по СНиП [50].

Первоначально усилия в своде рассчитывают для единичной полоски, как в двухшарнирной арке, очерченной по дуге окружности (рис. XII.32, а). Статическую неопределенность круговой двухшарнирной арки при действии вертикальных нагрузок снимают путем использования коэффициента k , учитывающего упругое обжатие свода:

$$k = \frac{1}{1 + \varepsilon J / (A f^2)} \approx \frac{1}{1 + [\varepsilon L^2 / (4 f^2)] 10^{-4}}; \quad H = k \frac{M_c}{f}, \quad (\text{XII.7})$$

где J, A — момент инерции и площадь поперечного сечения стержней в единичной полоске свода; ε — коэффициент, зависящий от отношения l/f и центрального угла φ_0 ; принимают по табл. XII.1; L — длина дуги свода; H — распор арки (единичной полоски свода); M_c — изгибающий момент по середине обычной балки пролетом l ; f — стрела подъема свода.

Таблица XII.1. Параметры для определения значения коэффициента k , учитывающего упругое обжатие свода

Коэффициенты	Отношение стрелы подъема к пролету l/f			
	1/2	1/3	1/4	1/5
φ_0 :				
°	90°00'00"	67°22'49"	53°07'48"	43°36'10"
рад	1,57080	1,17601	0,92730	0,76101
ε	1,0000	1,2628	1,4488	1,5747

Продолжение табл. XII.1

Коэффициенты	Отношение стрелы подъема к пролету l/f				
	1/6	1/7	1/8	1/9	1/10
φ_0 :					
°	36°52'12"	31°53'27"	28°04'21"	25°03'27"	22°37'11"
рад	0,64350	0,55660	0,48996	0,43734	0,39479
ε	1,6533	1,7073	1,7420	1,7681	1,7873

Распор и вертикальная реакция единичной полосы свода от постоянной нагрузки g составляют:

$$H = k [\varphi_0 l/2 - R (1 - \cos \varphi_0)] g R/f; \quad V = g \varphi_0 R, \quad (\text{XII.7})$$

где φ_0 — центральный угол в радианах от конька до опоры свода.

При расчете на снеговую нагрузку p свод рассматривают дважды. От равномерно распределенной снеговой нагрузки p_1 распор и вертикальная реакция опоры единичной полосы свода составляют:

$$H = k [p_1 l^2/(8f)] (1 - 5\alpha^2); \quad V = p_1 l (1 - 2\alpha)/2, \quad (\text{XII.8})$$

где $\alpha = a/l$ (для сводов с $\varphi_0 \leq 50^\circ$ $\alpha = 0$).

При треугольном распределении снеговой нагрузки p_2 распор и вертикальная реакция опоры единичной полосы свода составляют:

$$\left. \begin{aligned} H &= 0,0342 k (p_2 l^2/f) (1 - 2\alpha + 8\alpha^2); \\ V_A &= 1/48 p_2 l (11 - 26\alpha + 8\alpha^2); \quad V_B = 1/48 p_2 l (7 - 10\alpha - 8\alpha^2). \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII.9})$$

При ветровой нагрузке формулы для определения распора и вертикальных реакций являются сложными. Однако вычисление значений H_A , H_B , V_A , V_B значительно упрощается, если пользоваться коэффициентами, приведенными в табл. XII.2:

$$H_A = \gamma_1 \bar{q} l; \quad H_B = \gamma_2 \bar{q} l; \quad V_A = \eta_1 \bar{q} l; \quad V_B = \eta_2 \bar{q} l, \quad (\text{XII.10})$$

где $\bar{q}$ — расчетная ветровая нагрузка без аэродинамического коэффициента (аэродинамические коэффициенты c_1 , c_2 , c_3 учтены при составлении таблицы)

Таблица XII.2. Коэффициенты для определения распоров и вертикальных реакций сводчатого покрытия при действии ветровой нагрузки

Коэффици- енты	Отношение стрелы подъема к пролету f/l								
	1/2	1/3	1/4	1/5	1,6	1/7	1/8	1/9	1/10
γ_1	0,4319	0,3942	0,4204	0,4734	0,5372	0,6041	0,6729	0,7426	0,8130
γ_2	0,0469	0,1920	0,2979	0,3894	0,4711	0,5499	0,6269	0,7029	0,7780
η_1	0,4070	0,2757	0,2462	0,2369	0,2275	0,2218	0,2180	0,2154	0,2135
η_2	0,4070	0,3599	0,3381	0,3251	0,3156	0,3090	0,3042	0,3032	0,2975

Продольную силу и изгибающий момент в единичной полоске свода вычисляют по формулам:

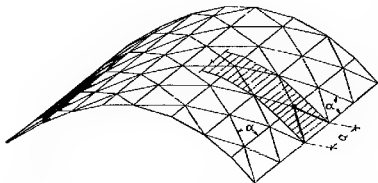
$$N = H \cos \varphi + Q \sin \varphi; \quad M = M_0 - Hy, \quad (\text{XII.11})$$

где Q — поперечная сила в балке пролетом l ; φ — угол наклона касательной в рассматриваемом сечении дуги свода к горизонтальной плоскости; y — ордината рассматриваемого сечения свода (см. рис. XII.32); M_0 — изгибающий момент в балке пролетом l .

Продольное сжимающее усилие в отдельном стержне одно- поясного свода определяют по формуле

$$N_1 = Na/(2 \sin \alpha), \quad (\text{XII.12})$$

где α — угол наклона стержня к образующей поверхности свода; a — ширина грузовой полосы (рис. XII.36).



В двухпоясном покрытии усилия в стержнях находят по формуле

$$N_1 = (N/2 \pm M/h) a / (2 \sin \alpha), \quad (\text{XII.13})$$

где h — толщина двухпоясного свода (расстояние между поясами двухслойной решетчатой системы).

При недостаточной жесткости стержней сетчатый свод может потерять общую устойчивость. Полагая S-образную форму продольного изгиба оси свода, можно приближенно вычислить критическую силу $N_{кр}$ по формуле Эйлера для центральной части покрытия без учета влияния торцевых диафрагм:

$$N_{кр} = \pi^2 E J_x \cdot 100 / (\mu L)^2, \quad (\text{XII.14})$$

где J_x — момент инерции поперечного сечения пары стержней в однопоясном своде (рис. XII.35) относительно горизонтальной оси, x , см^4 ; для круглых труб он равен

$$J_x = \pi (d^4 - d_1^4) / 64;$$

или J_x — момент инерции пары стержней, расположенных в одной вертикальной плоскости грузовой полосы a в двухпоясном своде, см^4 :

$$J_x = 2 A (h/2)^2 = A h^2 / 2;$$

здесь d, d_1 — паружный и внутренний диаметр трубы; см ; A — площадь поперечного сечения стержня, см^2 ; μ — коэффициент расчетной длины свода; его значение зависит от отношения стрелы подъема к пролету: $\mu = 0,55$ при $f/l = 1/3$; $\mu = 0,6$ при $f/l = 1/3$; $\mu = 0,65$ при $f/l = 1/2,5$; E — модуль упругости металла, которого выполнены стержни свода, МПа; 100 — коэффициент перехода от МПа к Н/см^2 .

Устойчивость свода в центральной части между торцевыми диафрагмами считается обеспеченной, если соблюдается условие

$$N_{кр} > N. \quad (\text{XII.15})$$

§ XII.8. РАСЧЕТ УСИЛИЙ В СКЛАДКЕ

При приближенном расчете решетчатую складку можно рассматривать как конструкцию, состоящую из отдельных плоских ферм. В этом случае статический расчет складки сводится к определению нагрузки, действующей на отдельные плоские грани, и вычислению усилий в обычной ферме (рис. XII.36).

Нагрузка на складку принимается сосредоточенной в узлах вдоль граней (рис. XII.36, б). Значение нагрузки подсчитывают по формуле

$$P = g A_{гр} + \rho \bar{A}_{гр}, \quad (\text{XII.16})$$

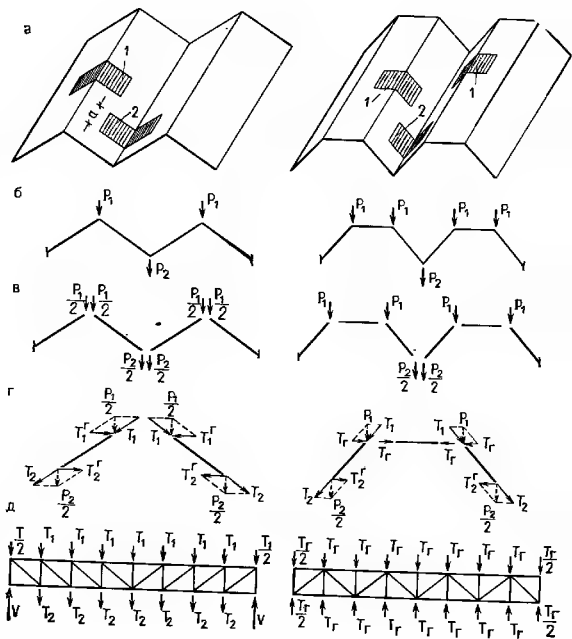


Рис. XII.36. К определению нагрузок на грани решетчатых складок
а — грузовые площади сбора постоянных нагрузок; б — нагрузка на складки (поперечное сечение); в — расчленение складок на отдельные грани; г — составляющие вертикальной нагрузки, действующей на грани складок; д — расчетные схемы наклонной и горизонтальной градей складок; 1 — грузовая площадь при подсчете сосредоточенной постоянной нагрузки на верхний узел складки; 2 — то же, на нижний узел

где g — расчетная постоянная нагрузка от собственной массы складки и кровельного ограждения, Н/м^2 ; нагрузку от решетчатой конструкции складки принимают по формуле (XII.3); p — расчетная равномерно распределенная снеговая нагрузка, Н/м^2 ; вычисляют по формуле (XII.4) с коэффициентом $c=1$; $A_{гр}$ — грузовая площадь сбора постоянной нагрузки; определение ее значения показано на рис. XII.36, а; $A_{сн}$ — грузовая площадь сбора снеговой нагрузки; определяют по горизонтальной проекции $A_{гр}$.

При расчленении складки на отдельные плоские грани вертикальная сосредоточенная нагрузка раскладывается на составляющие усилия T , действующие в плоскостях граней (рис. XII.36, г). Профиль поперечного сечения складки может быть любым, как

показано на рис. XII.3,а, принцип разложения складки на отдельные плоские грани и распределения нагрузки между ними остается без изменения.

Наклонные грани складки воспринимают узловую нагрузку T_1 и T_2 , действующую в их плоскостях, поэтому при определении усилий их рассматривают как обычные фермы с нагрузкой, приложенной к верхнему и нижнему поясам. Усилия в стержнях фермы находят либо построением диаграммы Максвелла—Кремоны либо методом вырезания узлов. В поясах складки усилия складывают от двух смежных граней.

Горизонтальные составляющие нагрузки в складке с треугольным поперечным сечением взаимно гасятся соседними гранями. В складке с трапециевидным профилем поперечного сечения горизонтальные составляющие нагрузки воспринимаются горизонтально расположенной гранью, как показано на рис. XII.36, а. В крайних складках с любым профилем поперечного сечения для восприятия горизонтальных составляющих предусматривают бортовые элементы или промежуточные диафрагмы.

§ XII.9. РАСЧЕТ УСИЛИЙ В КУПОЛЕ

При статическом расчете сетчатый купол предполагают сплошной оболочкой с безмоментным напряженным состоянием, характеризующимся следующим уравнением при осесимметричной нагрузке (рис. XII.37):

$$N_1/R + N_2/R = -q, \quad (\text{XII.17})$$

где N_1 — меридиональное усилие, его значение постоянно в пределах одного кольцевого сечения; N_2 — кольцевое усилие, его значение изменяется только вдоль меридиана; q — нормальная к поверхности оболочки внешняя нагрузка; R — радиус сферического купола.

Для определения меридионального усилия N_1 достаточно горизонтальной плоскостью отсечь верхнюю часть купола и рассмотреть ее в равновесии. На отсеченный сферический сегмент (рис. XII.37, а) действует суммарная нагрузка от собственной массы купола:

$$2\pi R f g = 2\pi R (R - R \cos \varphi) g,$$

которая уравновешивается меридиональными усилиями N_1 по периметру кольцевого сечения с радиусом $r = R \sin \varphi$:

$$N_1 2\pi r \sin \varphi = N_1 2\pi R \sin^2 \varphi,$$

из чего следует

$$N_1 = -g R (1 - \cos \varphi) / \sin^2 \varphi = -g R / (1 + \cos \varphi). \quad (\text{XII.18})$$

Кольцевое усилие N_2 от собственной массы купола находят из уравнения (XII.17):

$$N_2 = -q R - N_1 = -g R [\cos \varphi - 1 / (1 + \cos \varphi)], \quad (\text{XII.19})$$

где $q = g \cos \varphi$ — нормальная составляющая нагрузки в уровне кольцевого сечения сферического купола.

Постоянную нагрузку g вычисляют с учетом всех компонентов кровли и собственной массы решетки купола, нормативную

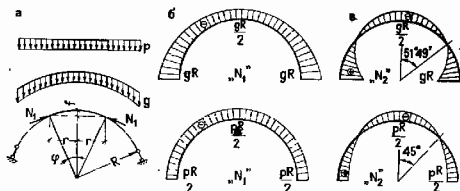


Рис. XII.37. Усилия в куполе от вертикальных нагрузок

а — расчетная схема; б — эпюры меридиональных и кольцевых усилий от собственной массы купола; в — то же, от снеговой нагрузки

грузку от которой принимают по эмпирической формуле (XII.3) с использованием коэффициента $\Omega = 3-6$ для стальных куполов и $\Omega = 2-4$ — для алюминиевых.

При снеговой нагрузке p меридиональное усилие в любом сечении имеет постоянное значение:

$$N_1 = -\pi r^2 p / (2\pi r \sin \varphi) = -pR/2, \quad (\text{XII.20})$$

с учетом нормальной составляющей нагрузки в уровне кольцевого сечения $q = p \cos^2 \varphi$, кольцевое усилие N_2 находят из уравнения (XII.17):

$$N_2 = -qR + pR/2 = -1/2 pR \cos 2\varphi, \quad (\text{XII.21})$$

где p — расчетная снеговая нагрузка на 1 м^2 горизонтальной поверхности купола; вычисляют как p_1 для сводчатого покрытия по формуле (XII.4):

При расчете на ветровую нагрузку предполагают кососимметричное распределение напора ветра по поверхности купола в соответствии с рис. XII.38:

$$q_v = q_v^0 \sin \varphi \sin \theta, \quad (\text{XII.22})$$

где q_v^0 — расчетная ветровая нагрузка на 1 м^2 вертикальной плоскости на уровне основания купола; определяется по формуле (XII.5) без аэродинамического коэффициента.

Меридиональные и кольцевые усилия в сетчатом куполе от ветровой нагрузки составляют (согласно [32, 37]):

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= q_v^0 R \frac{\cos \varphi}{\sin^3 \varphi} \left(\frac{2}{3} - \cos \varphi + \frac{1}{3} \cos^3 \varphi \right) \sin \theta; \\ N_2 &= q_v^0 R \left[\sin \varphi - \frac{\cos \varphi}{\sin^3 \varphi} \left(\frac{2}{3} - \cos \varphi + \frac{1}{3} \cos^3 \varphi \right) \right] \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII.23})$$

Распределение меридиональных и кольцевых усилий в куполе от вертикальных нагрузок показано на рис. XII.37. Максимальные усилия от ветра возникают в куполе при горизонтальном угле $\theta = 90^\circ$. Для этого случая на рис. XII.38 приведены готовые значения эпюр усилий N_1 и N_2 .

Следует помнить, что усилия N_1 , N_2 являются линейными. Для определения усилий в конкретных стержнях купола необходимо

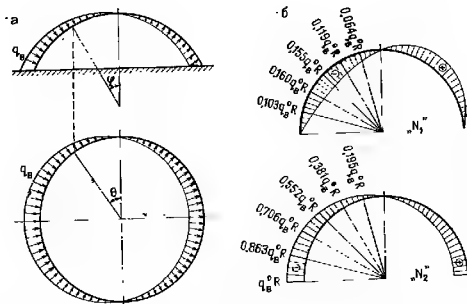


Рис. XII.38. Усилия в куполе от ветровой нагрузки

a — расчетная схема; *b* — эпюры меридиональных усилий N_1 и кольцевых усилий N_2 по углу $\theta = 90^\circ$

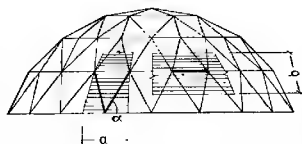


Рис. XII.39. Расчетные полосы для определения усилий в выделенных стержнях сетчатого купола

выделить силовые (грузовые) полосы, с которых собираются усилия в этих стержнях (рис. XII.39). Если удастся выделить стержень, расположенный по меридиану и собирающий усилия с грузовой полосы шириной a , то усилие в нем от каждого вида нагрузки будет равно:

$$P_1 = N_1 a, \quad (\text{XII.28})$$

Аналогично определяют усилие в пояском стержне:

$$P_2 = N b, \quad (\text{XII.29})$$

Если в решетчатой системе купола нет стержня вдоль меридиана, то нужно выделить пару симметричных стержней, расположенных с шагом a вдоль кольцевого сечения (см. рис. XII.39). В таком случае усилие в одном стержне будет равно:

$$P_1 = N_1 a / (2 \sin \alpha), \quad (\text{XII.30})$$

где α — угол наклона стержня к кольцевой линии.

Для обеспечения устойчивости купола стержни должны обладать необходимой жесткостью. Согласно исследованиям Райта [42], устойчивость купола обеспечивается, если соблюдается условие:

$$P_1 \leq P_{кр}; \quad P_{кр} = (0,8 E A i / R) 100, \quad (\text{XII.31})$$

где $P_{кр}$ — критическое значение продольного усилия в стержне купола, H ; E — модуль упругости материала стержней купола, МПа; R — радиус кривизны купола, см; i — радиус инерции поперечного сечения стержня в однополосном куполе, см (в двухполосном куполе $i = h/2$).

Достаточно точное определение напряженного состояния пологой оболочки связано со сложными и трудоемкими в математическом плане вычислениями. Для существенного упрощения процесса расчетов и раскрытия простыми средствами сущности действия усилий в покрытии при одновременном сохранении приемлемой степени точности можно воспользоваться следующими основными допущениями.

1. Вертикальную равномерно распределенную нагрузку на покрытие q принимаем нормальной к поверхности. Подобную предпосылку широко используют в приближенных методах расчета пологих оболочек.

2. Оболочка имеет поверхность, являющуюся элементом сферы.

3. Контур оболочки обладает весьма малой деформативностью в своей плоскости (см. рис. XII. 8).

Расчетная схема пологой оболочки приведена на рис. XII.40. Полагаем, что по контуру покрытия вся внешняя нагрузка уравновешивается сдвигающими усилиями S_K . В оболочке под действием нагрузки возникают меридиональные усилия N_1 , кольцевые усилия N_2 и сдвигающие усилия S . Вдоль главных осей покрытия x, y контурные меридиональные усилия равны нулю, так как сопротивление им ничем не оказывается. В этих же точках покрытия отсутствуют кольцевые усилия, поскольку оболочка не может деформироваться вследствие значительной жесткости опорного контура $\epsilon_K=0$ (рис. XII. 40, б).

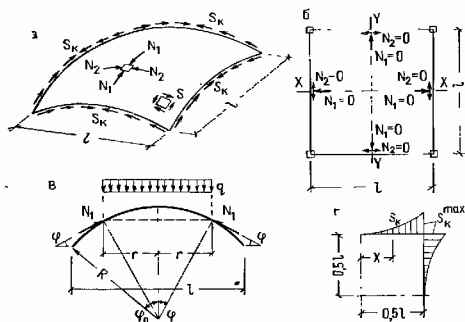


Рис. XII.40. Расчетные предпосылки для определения усилий в плите пологой оболочки
а — расчетная схема оболочки при действии вертикальной равномерно распределенной нагрузки q ; б — граничные условия меридиональных и кольцевых усилий; в — действие нагрузки и усилий на сферический сегмент (поперечное сечение); s — расчетная схема распределения сдвигающих усилий по контуру покрытия; N_1 — меридиональные усилия; N_2 — кольцевые усилия; S — сдвигающие усилия

Для определения меридиональных усилий в центральной зоне оболочки можно отсечь горизонтальной плоскостью часть покрытия (рис. XII. 40, в) и рассмотреть ее в равновесии. На отсеченный сферический сегмент передается суммарная нагрузка

$$\Sigma q = \pi r^2 q,$$

которая уравнивается меридиональными усилиями N_1 , действующими по периметру кольцевого сечения $N_1 2\pi r \sin \varphi$, из чего следует, что

$$N_1 = -qr/(2 \sin \varphi) = -qR/2, \quad (\text{XII.28})$$

где знак «—» обозначает сжатие.

В центре покрытия меридиональные и кольцевые усилия равны между собой:

$$N_1 = N_2 = -qR/2. \quad (\text{XII.29})$$

Для определения кольцевых усилий по осям x, y вблизи контура покрытия воспользуемся известным уравнением для оболочки вращения (XII. 17); в данном случае при $N_1 \approx 0$:

$$N_2 \approx -qR. \quad (\text{XII.30})$$

На контуре покрытия сдвигающие усилия S_K имеют максимальные значения в углах, где по напряженному состоянию полуглая оболочка существенно отличается от купола, и равны нулю по середине сторон контура вследствие симметрии оболочки. Изменения сдвигающих усилий S_K вдоль каждой половины сторон контура аппроксимируем кривой, являющейся средней линией между параболой второй степени и третьей степени¹:

$$S_K = S_K^{\max} [x^2/(0,5l)^2 + x^3/(0,5l)^3]/2. \quad (\text{XII.31})$$

Общая внешняя нагрузка на всю пологую оболочку составляет $\Sigma q = l^2 q$, она уравнивается суммой вертикальных проекций сдвигающих усилий S_K вдоль периметра покрытия:

$$8 \int_0^{\frac{l}{2}} \frac{S_K^{\max} \sin \varphi_0}{2} \left[\frac{x^2}{(0,5l)^2} + \frac{x^3}{(0,5l)^3} \right] dx = \frac{7}{6} S_K^{\max} l \sin \varphi_0,$$

из чего находится искомое значение $S_K^{\max}$:

$$S_K^{\max} = 6ql/(7 \sin \varphi_0) = 12qR/7 = 1,71qR. \quad (\text{XII.32})$$

Меридиональные и кольцевые усилия в углу оболочки имеют максимальные значения. Их легко найти по схеме, приведенной на рис. XII.41:

$$N_2 = -N_1 = 2S_K^{\max} \cos 45^\circ / (2 \cos 45^\circ) = S_K^{\max} = 1,71qR. \quad (\text{XII.33})$$

Меридиональные, кольцевые и сдвигающие усилия по формулам (XII.28)—(XII.33) вычисляют для элементов размером 1×1

¹ Такая аппроксимация ближе отвечает принятым предпосылкам, чем известная по учебному пособию [15] аппроксимация наложенным прямой линией и параболой третьей степени.

в плите оболочки. Эпюры усилий для единичных полосок в основных сечениях покрытия приведены на рис. XII.42. Для определения расчетных усилий в стержнях решетчатой системы оболочки необходимо единичные усилия увеличить на шаг этих стержней например:

$$P_1 = N_1 a; \quad P_2 = N_2 a_1, \quad (\text{XII.34})$$

где a — шаг стержней вдоль осей x, y ; a_1 — расстояние между соседними диагональными стержнями.

От сдвигающих усилий S_K контурные диафрагмы подвергаются растяжению¹ по линии контакта с плитой оболочки (см. рис. XII.40, а). Максимального значения растягивающие усилия по грани контурной конструкции N_K достигают в коньке

$$N_K^{\max} = \int_0^{\frac{l}{2}} \frac{S_K^{\max}}{2} \left[\frac{x^3}{(0,5l)^2} + \frac{x^3}{(0,5l)^3} \right] dx = \frac{7}{48} S_K^{\max} l. \quad (\text{XII.35})$$

В коньке контурное ребро (см. рис. XII.8, а), верхний пояс контурной арки (см. рис. 8, б) и криволинейный брус (см. рис. XII, 8, з) от усилий N_K испытывают внецентричное растяжение. На контурную ферму усилия N_K передаются через верхний пояс.

Кроме N_K сдвигающими усилиями от плиты оболочки на диафрагму передается вертикальная нагрузка от собственной массы покрытия и снега². Усилия в диафрагмах от вертикальной нагрузки определяют обычными приемами строительной механики. В частности, для расчета контурной фермы эта нагрузка сосредотачивается в узлах верхнего пояса.

После подбора сечений стержней проверяют устойчивость

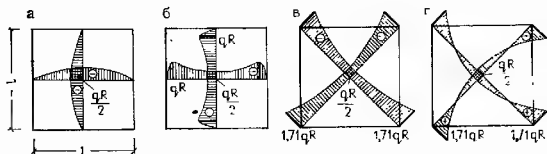


Рис. XII.42. Эпюры усилий в единичных полосках плиты пологой оболочки
а, б — меридиональные усилия N_1 ; в, г — кольцевые усилия N_2

¹ На грани диафрагм передаются сдвигающие усилия, обратные по направлению и равные по значению сдвигающим усилиям в оболочке.

² В приближенном расчете диафрагмы пологой оболочки можно учитывать усилия только от вертикальной нагрузки, пренебрегая влиянием N_K .

оболочки в целом. На основании допущения 2 (см. с...) можно считать, что общая устойчивость решетчатой конструкции пологой оболочки обеспечивается при соблюдении условия (XII.27) для сетчатого купола. С учетом выражения для усилий в центре покрытия (XII.29) условие устойчивости оболочки приводят к виду:

$$q \leq q_{кр}; \quad q_{кр} = 0,16 E A i / (a R^2), \quad (\text{XII.36})$$

где $q_{кр}$ — критическое значение равномерно распределенной нагрузки, кН/м²; остальные обозначения те же, что для зависимости (XII.27).

§ XII.11. РАСЧЕТ УСИЛИЙ В ГИПАРЕ

Оболочки с поверхностью гиперболического параболоида обладают замечательным свойством для статического расчета: в любом сечении, параллельном диагональному, при квадратном плане покрытия постоянны параметр l^2/f рис. XII.43, а):

$$b^2/f_b = l^2/f = \text{const}, \quad (\text{XII.37})$$

При прямоугольном плане покрытия постоянны параметр $l_1 l_2/f$ (рис. XII.43, б):

$$b c / f_{bc} = l_1 l_2 / f = \text{const}, \quad (\text{XII.38})$$

где b, c — проекции образующих рассматриваемого участка поверхности гипара; $f_b; f_{bc}$ — стрела провисания (подъема) оболочки на рассматриваемом участке поверхности гипара.

В любом сечении, параллельном диагональному, гиперболическая оболочка оказывается вогнутой или выпуклой, причем в направлении вогнутости оболочка растягивается, а в направлении выпуклости — сжимается (рис. XII.44). В силу отмеченного свойства гипаров [см. уравнения (XII.37), (XII.38)] значения усилий в любой точке поверхности оболочки оказываются постоянными, поэтому для вычисления их достаточно рассмотреть только диагональные полосы оболочки, для которых известны значения l, f (рис. XII.45). В этих сечениях опорами полосок служат бортовые элементы покрытия, а равномерная нагрузка q распределяется поровну между направлениями кривизны.

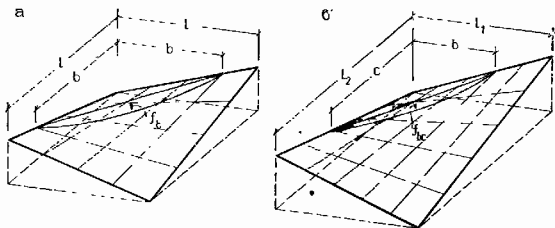


Рис. XII.43. Геометрические параметры однопестикового гипара при произвольном сечении, параллельном диагональному

а — при квадратном плане покрытия; б — при прямоугольном плане покрытия

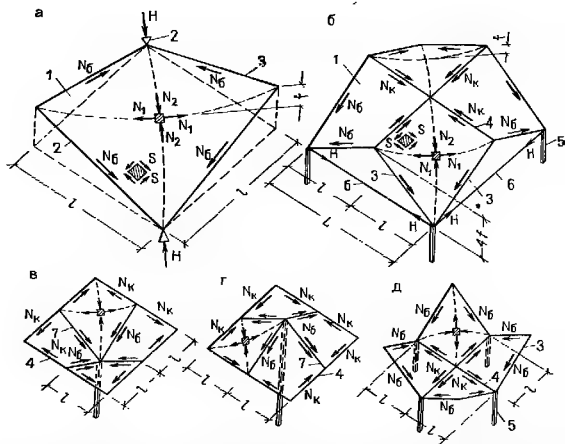


Рис. XII.44. Расчетные схемы покрытий с поверхностью гиперболического параболоида
 а — однолентковый гитар; б, в, г, д — четырехлентковые (составные) гитары; 1 — оболочка (стержневая система); 2 — фундамент, пилон или контрфорс; 3 — бортовые элементы; 4 — коньковые ребра; 5 — колонны; 6 — затяжка; 7 — центральные наклонные ребра

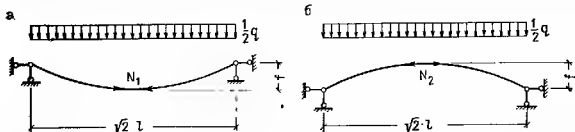


Рис. XII.45. Расчетные схемы оболочки в диагональных сечениях покрытия с поверхностью гитара

а — вогнутая полоса (растянутая); б — выпуклая полоса (сжатая)

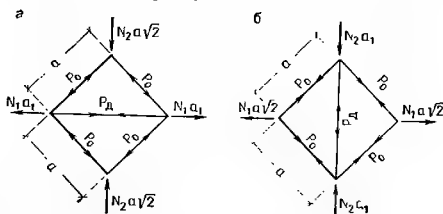
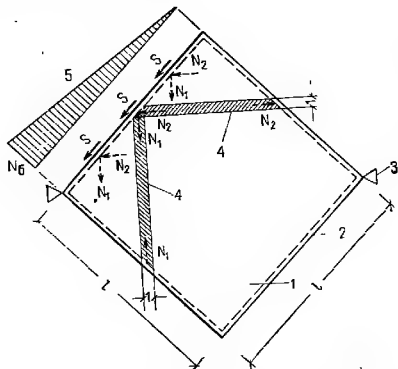


Рис. XII.46. Схема усилий в стержнях решетчатой оболочки гитара

а — при расположении диагональных стержней в вогнутом направлении кривизны; б — то же, в выпуклом

Рис. XII.47. Схема передачи усилий с оболочки однолепесткового гипара на бортовой элемент



1 — оболочка (сетчатая конструкция); 2 — бортовой элемент; 3 — фундамент; 4 — расчетные полосы оболочки; 5 — эпюра сжимающих усилий в бортовом элементе

Растягивающее усилие в направлении вогнутости оболочки N_1 и сжимающее усилие в направлении выпуклости N_2 составляют:

$$N_1 = 0,5 (\sqrt{2} l)^2 / (8f) = q l^2 / (8f); \quad N_2 = -q l^2 / (8f), \quad (\text{XII.39})$$

где q — расчетная нагрузка на единицу площади горизонтальной проекции покрытия.

Вследствие постоянства усилий N_1 и N_2 в любой точке поверхности оболочки сдвигающие усилия S также постоянны и равны:

$$S = N_1 = -N_2. \quad (\text{XII.40})$$

В сплошной оболочке гипара усилия N_1 и N_2 действуют в расчетных полосках шириной 1 м. Для сетчатой оболочки с диагоналями в вогнутом направлении кривизны (рис. XII.46, а) усилия в стержнях составляют:

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= -N_2 a \sqrt{2} / (2 \cos 45^\circ) = -N_2 a; \\ P_d &= N_1 a_1 + |N_2| a \sqrt{2} = N_1 a 3 / \sqrt{2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII.41})$$

где P_0 — усилие в стержне вдоль образующей; P_d — усилие в диагональном стержне; a_1 — расстояние между стержнями вдоль образующих (размер ячейки).

Для сетчатой оболочки с диагоналями в выпуклом направлении кривизны (рис. XII.46, б) усилия в стержнях равны:

$$P_0 = N_1 a; \quad P_d = -N_2 a 3 / \sqrt{2}. \quad (\text{XII.42})$$

Сдвигающими усилиями S бортовые элементы однолепесткового гипара и наклонные ребра составного гипара сжимаются (рис. XII.47), максимальное усилие сжатия данные элементы испытывают внизу

$$N_6 = S l / \cos \alpha, \quad (\text{XII.43})$$

где α — угол наклона бортового элемента к горизонтальной плоскости.

На фундаменты или диагональную затяжку в однолепестковом гипаре (см. рис. XII.44,а) передается распор:

$$H = 2 S l \cos 45^\circ = \sqrt{2} S l. \quad (\text{XII.44})$$

В четырехлепестковом гипаре ребра по осям симметрии покрытия растягиваются или сжимаются (в зависимости от схемы оболочки на рис. XII.44) усилиями:

$$N_k = 2 \rho S l; \quad N_6 = 2 \rho S l / \cos \alpha. \quad (\text{XII.45})$$

где ρ — понижающий коэффициент, учитывающий краевой эффект при сочленении лепестков гипара в коньковых ребрах; принимается равным 0,85 согласно [56].

Затяжка по контуру покрытия (см. рис. XII.44,б) растягивается усилием:

$$H = N_6 \cos \alpha = S l. \quad (\text{XII.46})$$

Расчет гипара на прямоугольном плане (см. рис. XII.43,б) отличается от изложенного выше только тем, что:

$$N_1 = -N_2 = S = q l_1 l_2 / (8 f). \quad (\text{XII.47})$$

§ XII.12. ПОДБОР СЕЧЕНИЙ СТЕРЖНЕЙ И РАСЧЕТ УЗЛОВ

После статического расчета плиты или оболочки производят подбор сечений стержней, затем рассчитывают на прочность элементы узлового сопряжения. Для подбора сечений в прил. 9—11 приведен сортамент стальных круглых и квадратных труб. Рекомендуется в первую очередь применять сварные трубы, как более дешевые. Стержни можно назначать из профилей в виде уголков, швеллеров, тавров и т. д. В этом случае нужно использовать сортамент, имеющийся в учебниках и справочниках по металлическим конструкциям [32, 37, 49].

Площадь сечения растянутых стержней в плите или оболочке определяют из условия прочности:

$$A \geq N / (R_y \gamma_c \cdot 100), \quad (\text{XII.48})$$

где N — расчетное усилие в стержне; R_y — расчетное сопротивление стали или алюминиевого сплава, МПа; принимают по прил. 1 и 2; для алюминиевой плиты или оболочки со сварными узлами необходимо по прил. 2 учитывать частичное разупрочнение сплава в околошовной зоне; 100 — коэффициент перехода от МПа к Н/см²; γ_c — коэффициент условий работы.

Сечения сжатых стержней в плите или оболочке подбирают путем пробных попыток из условия устойчивости:

$$N / (\varphi A \cdot 100) \leq R_y \gamma_c, \quad (\text{XII.49})$$

где φ — коэффициент продольного изгиба; принимают по прил. 5 в зависимости от гибкости $\lambda = l_{ef} / i$ и марки стали или алюминиевого сплава; l_{ef} — расчетная длина стержня между узлами; зависит от решения узлового соединения; приближенно принимают равной геометрической длине стержня для поясов и опорных раскосов; для стержней решетки вводят понижающий коэффициент 0,8; i — радиус инерции сечения стержня; 100 — коэффициент перехода от МПа к Н/см²; γ_c — коэффициент условий работы.

Сжатые-изогнутые стержни, например в сетчатом своде, рассчитывают на устойчивость в плоскости действия изгибающего момента:

$$N/(\varphi_e A \cdot 100) \leq R_y \gamma_c, \quad (\text{XII.50})$$

где φ_e — коэффициент понижения расчетного сопротивления при внецентральном сжатии; определяют по нормам проектирования [51, 52].

В сварных узлах типа «ИФИ», «Октаплатте» и др. расчетом определяют необходимую толщину угловых швов для крепления стержней:

$$k_f \geq N/(\beta_f l_w R_{wf} \cdot 100); \quad k_f \geq N/(\beta_z l_w R_{wz} \cdot 100), \quad (\text{XII.51})$$

где N — расчетное усилие в стержне, Н; l_w — расчетная длина шва по периметру конца прикрепляемого стержня, см; β_f — коэффициент, принимаемый равным: 0,7 при ручной сварке стальных и алюминиевых конструкций, в остальных случаях — по нормам проектирования [51, 52]; β_z — коэффициент, принимаемый равным: 1 при ручной сварке, в остальных случаях — по нормам проектирования; R_{wf} — расчетное сопротивление срезу по металлу углового шва, МПа; принимают по прил. 1 или 2; R_{wz} — расчетное сопротивление углового шва срезу по металлу границы сплавления, МПа; принимают по прил. 1; 100 — коэффициент перехода от МПа к Н/см².

В узлах типа «Меро», «Веймар», «МАрХИ» и др. диаметр несущего болта подбирают из условия прочности при осевом растяжении:

$$N/(A_{bn} \cdot 100) \leq R_{bt} \quad \text{или} \quad N/A_{bn} \leq 0,7 R_{bun} \cdot 100/\gamma_u, \quad (\text{XII.52})$$

где N — расчетное усилие в стержне, Н; A_{bn} — площадь сечения болта по резьбе; принимают по прил. 4; R_{bt} — расчетное сопротивление болта растяжению, МПа; принимают в зависимости от класса прочности по прил. 3; R_{bun} — наименьшее временное сопротивление высокопрочной стали разрыву после термической обработки болта; принимают в зависимости от диаметра болта и марки стали по прил. 3; γ_u — коэффициент надежности болтового соединения; принимают равным 1,3 для болтов диаметром до 48 мм; 100 — коэффициент перехода от МПа к Н/см².

В узлах типа «Юнистрат», «ЦНИИСК» и других толщину фанеры и диаметр болтов для крепления одного стержня рассчитывают из условия прочности соединения на срез и смятие:

$$N/[n n_s (\pi d^2/4) 100] \leq R_{bs} \gamma_b \quad \text{и} \quad N/(n d \Sigma t \cdot 100) \leq R_{bp} \gamma_b, \quad (\text{XII.53})$$

где n — число болтов в соединении стержня с узлом; n_s — число срезов одного болта; d — наружный диаметр болта; принимают по прил. 4; Σt — наименьшая суммарная толщина деталей, сминаемых в одном направлении; R_{bs} — расчетное сопротивление болта срезу; определяют по прил. 3; R_{bp} — расчетное сопротивление болтового соединения смятию, МПа; определяют по прил. 1 или 2; γ_b — коэффициент условий работы соединения; при болтах повышенной точности $\gamma_b = 1$, грубой и нормальной точности — $\gamma_b = 0,9$.

Глава XIII. Примеры расчета

§ XIII.1. СТЕРЖНЕВАЯ ПЛИТА ИЗ ПЕНТАЭДРОВ

Спортивно-демонстрационный зал с трибунами на 1500 мест имеет размер плане 66×66 м, его перекрывают стержневой плитой из пентаэдров (рис. XIII.1). Ячейки поясов плиты имеют размер 3×3 м, высота плиты — 1/22 = 3 м. Материал для стержней плиты — круглые трубы из стали марк

ВСтЗпс4. Узловые соединения — типа МАрхИ на высокопрочных болтах. Шаг колонн по периметру зала 6 м, опирание плиты на колонны точечное. Место строительства — I снеговой район СССР.

Подсчет постоянных нагрузок на 1 м² покрытия

Состав покрытия	Нормативная нагрузка, Н/м ²	Коэффициент перегрузки	Расчетная нагрузка, Н/м ²
Гравийно-битумная защита толщиной 15 мм, плотностью 1800 кг/м ³	270	1,3	351
Трехслойный рулонный ковер	100	1,3	130
Пенопласт толщиной 60 мм, плотностью 60 кг/м ³	36	1,2	43
Оклеенная паронизация	30	1,3	39
Стальной профилированный настил Н60-782-0,8	109	1,1	120
Прогонь из стального прокатного швеллера № 10	29	1,1	32
Стальная решетчатая плита	660	1,1	726
Подвесная осветительная и акустическая аппаратура	30	1,1	33
Итого	1264	—	1474

Нормативная снеговая нагрузка для I района СССР, согласно [50], составляет 500 Н/м².

При отношении нормативной нагрузки от собственной массы покрытия к нормативной нагрузке от снегового покрова $1264/500=2,5$ коэффициент перегрузки для снега составляет 1,4.

Расчетная нагрузка на 1 м² плиты:

$$p = 1474 + 500 \cdot 1,4 = 2174 \text{ Н/м}^2 = 2,17 \text{ кН/м}^2.$$

Исходному условию опирания покрытия на периметрический ряд колонн соответствует схема I на рис. XI.30.

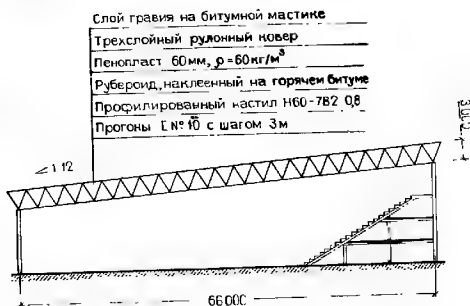


Рис. XIII.1. Поперечный разрез спортивно-демонстрационного зала, перекрытого стержневой плитой из пентаэдров (пример)

Максимальные изгибающие моменты в единичной полоске плиты при $l_n/l_k = 1$ по формулам (XI.1):

$$M_k = M_d = 36,5 \cdot 2,17 \cdot 66^2 \cdot 10^{-3} = 345 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Максимальная опорная реакция единичной полоски плиты по формуле (XI.2):

$$V = 42,2 \cdot 2,17 \cdot 66 \cdot 10^{-2} = 60,4 \text{ кН}.$$

Угол наклона раскосов к плоскости плиты:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{2} h/a = 1,4142 \cdot 3/3 = 1,4142;$$

$$\alpha = 54^\circ 44'; \sin \alpha = 0,8165.$$

Максимальные усилия в поясах и опорных раскосах плиты по формулам (XI.11) составляют:

$$N_n = \pm 2,1 \cdot 345 \cdot 3/3 = \pm 724 \text{ кН}; N_p = -0,8 \cdot 60,4 \cdot 6/0,8165 = -355 \text{ кН}.$$

Усилия в поясах и раскосах плиты вдоль главных осей определяем в соответствии с эпюрами на рис. XI.38, используя следующие зависимости:

$$N_n = N_n^{\max} 4x(l-x)/l^2;$$

$$N_p = N_p^{\max} (0,5l-x)/(0,5l).$$

Подсчет усилий в поясах и раскосах

Расстояние от опоры x , м	Усилия, кН		Расстояние от опоры x , м	Усилия, кН	
	N_n	N_p		N_n	N_p
0	0	-355	18	± 574	± 161
3	± 126	± 323	21	± 628	± 129
6	± 239	± 290	24	± 670	± 97
9	± 341	± 258	27	± 700	± 65
12	± 431	± 226	30	± 718	± 32
15	± 509	± 194	33	± 724	0

Расчетное сопротивление R_y стали марки ВСтЗпс4 по прил. 1 и СНиП II-23-81 составляет 235 МПа.

Пробными попытками по формуле (XII.49), прил. 5 и 10 подбираем сечение наиболее нагруженных стержней верхнего пояса из горячекатаной трубы $\varnothing 133 \times 11$ мм:

$$A = 42,16 \text{ см}^2; i = 4,33 \text{ см}; \lambda = 300/4,33 = 69,2; \varphi = 0,757;$$

$$\sigma = 724\,000/(0,757 \cdot 42,16 \cdot 100) = 229 \text{ МПа} < R_y.$$

Требуемую площадь сечения стержней с максимальным усилием в нижнем поясе находим по формуле (XII.48):

$$A \geq 724\,000/(235 \cdot 100) = 30,8 \text{ см}^2.$$

По прил. 10 принимаем горячекатаную трубу $\varnothing 133 \times 8$ мм с $A = 31,42 \text{ см}^2$

Длину опорного раскоса вычисляем через высоту плиты и размер поясничной ячейки:

$$l_p = \sqrt{h^2 + (a/\sqrt{2})^2} = \sqrt{3000^2 + 3000^2/2} = 3674 \text{ мм}.$$

Для опорных раскосов по формуле (XII.49) и прил. 10 подбираем горячекатаную трубу $\varnothing 133 \times 6$ мм:

$$A = 23,94 \text{ см}^2; i = 4,5 \text{ см}; \lambda = 367,4/4,5 = 81,6; \varphi = 0,67;$$

$$\sigma = 355\,000/(0,67 \cdot 23,94 \cdot 100) = 221 \text{ МПа}.$$

Аналогично подбираем сечения стержней для поясов и раскосов вдоль главных осей плиты. Результат сводим в таблицу, оставляя для всех стержней пять типов сечений.

Результат подбора сечения стержней

Расстояние от опоры, м	Сечения стержней из труб			
	верхний пояс	нижний пояс	сжатые рас- косы	растянутые раскосы
0	Ø 83×6	Ø 83×6	Ø 133×6	—
3	Ø 83×6	Ø 83×6	Ø 133×6	Ø 83×6
6	Ø 108×6	Ø 83×6	Ø 133×6	Ø 83×6
9	Ø 133×8	Ø 83×6	Ø 133×6	Ø 83×6
12	Ø 133×8	Ø 108×6	Ø 133×6	Ø 83×6
15	Ø 133×8	Ø 133×6	Ø 133×6	Ø 83×6
18	Ø 133×8	Ø 133×8	Ø 108×6	Ø 83×6
21	Ø 133×11	Ø 133×8	Ø 108×6	Ø 83×6
24	Ø 133×11	Ø 133×8	Ø 108×6	Ø 83×6
27	Ø 133×11	Ø 133×8	Ø 83×6	Ø 83×6
30	Ø 183×11	Ø 133×8	Ø 83×6	Ø 83×6
33	Ø 133×11	Ø 133×8	Ø 83×6	Ø 83×6

Требуемая площадь сечения высокопрочного болта из стали 30ХЗМФ для крепления стержня с максимальным растягивающим усилием по формуле (XII.52) составляет:

$$A_{bn} \geq 724\,000 \cdot 1,3 / (0,7 \cdot 900 \cdot 100) = 14,94 \text{ см}^2,$$

Этому значению по прил. 4 соответствует болт с наружным диаметром 48 мм, площадь поперечного сечения которого $A_{b,n} = 14,72 \text{ см}^2$.

При проверке несущей способности 1 м ширины стального профилированного настила Н60-782-0,8 по прил. 6 находим: $W = 13,9 \text{ см}^3$; $I_x = 51,4 \text{ см}^4$; сталь марки ВСтЗкп; подсчитываем нагрузку на 1 м² настила:

$$g^n = 270 + 100 + 36 + 30 + 109 = 545 \text{ Н/м}^2;$$

$$g = 351 + 130 + 43 + 39 + 120 = 683 \text{ Н/м}^2;$$

определяем коэффициент перегрузки для снега, руководствуясь пояснениями к формуле (XII.4):

$$g^n/p_0 = 545/500 = 1,09 > 1; n = 1,4;$$

находим расчетную нагрузку и изгибающий момент:

$$q = 683 + 500 \cdot 1,4 = 1383 \text{ Н/м}^2;$$

$$M = 1,383 \cdot 3^2 / 8 = 1,56 \text{ кН·м};$$

вычисляем несущую способность настила шириной 1 м:

$$W R_y = 13,9 \cdot 210 \cdot 100 = 292\,000 \text{ Н·см} = 2,92 \text{ кН·м};$$

проверяем относительный прогиб настила:

$$q^n = 545 + 500 = 1045 \text{ Н/м}^2;$$

$$\frac{f}{l} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1045 \cdot 3^3 \cdot 100}{21 \cdot 10^4 \cdot 51,4} = \frac{1}{294} < \frac{1}{150}$$

и делаем вывод, что несущей способности и жесткости настила достаточно.

§ XIII.2. СТЕРЖНЕВАЯ ПЛИТА ИЗ ТЕТРАЭДРОВ

Выставочный павильон диаметром 36 м перекрывают стержневой плитой из тетраэдров (рис. XIII.2). Длина всех стержней 2 м, высота плиты $2/1,2247 = 1,633 \text{ м}$. Материал для стержней плиты — круглые трубы из алюминиевого

сплава 1915Т. Узловые сопряжения могут быть типа МАРХИ. Шаг колонн по периметру павильона 3,464 м, опирание плиты на колонны через решетчатые капителли. Место строительства — Омск.

Подсчет нагрузок на 1 м² покрытия

Состав покрытия	Нормативная нагрузка, Н/м ²	Коэффициент перегрузки	Расчетная нагрузка, Н/м ²
Гравийно-битумный слой толщиной 20 мм, плотностью 1800 кг/м ³	360	1,3	468
Четырехслойный рулонный ковер	130	1,3	169
Пенопласт толщиной 60 мм, плотностью 40 кг/м ³	24	1,2	29
Оклеенная парозоляция	30	1,3	39
Алюминиевый профилированный лист ЛАГ-2 толщиной 0,8 мм	32,4	1,1	35,6
Алюминиевые прогоны ПЗ00 № 512	24	1,1	26,4
Алюминиевая решетчатая плита	240	1,1	264
Снег для II района СССР	700	1,4	980
Итого	1540	—	2011

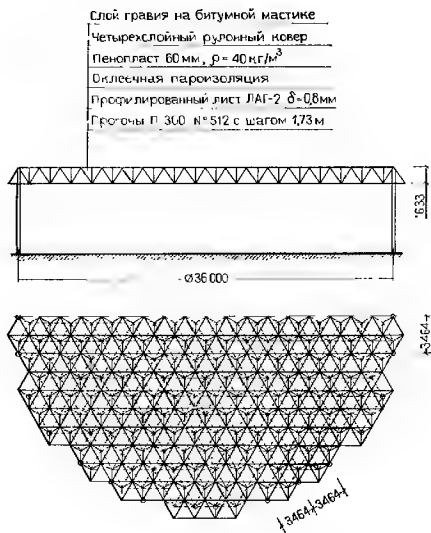


Рис. XIII.2. Высота павильонного покрытия в вентилируемой стержневой плите из тетраэдров (по мер)

Максимальный изгибающий момент и опорная реакция единичной полосы круглой плиты по формулам (XI.5) составляют:

$$M_r = M_t = 0,1875 \cdot 2,011 (36/2)^2 = 122 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$V = 0,5 \cdot 2,011 \cdot 36/2 = 18,1 \text{ кН}.$$

Максимальные усилия в поясах и опорных раскосах перекрытия вычисляем по формулам (XI.10):

$$N_n = \pm 1,3 \frac{(0,866 - 0,289) \cdot 122 \cdot 2}{1,633} = \pm 112 \text{ кН};$$

$$N_p = -1,6 \frac{18,1 \cdot 3,464}{2 \cdot 0,8165} = -61,4 \text{ кН}; \quad N_p = 1,6 \frac{18,1 \cdot 3,464}{1 \cdot 0,8165} = 123 \text{ кН},$$

где $\sin \alpha = \sin 54^\circ 44' 08'' = 0,8165$; $n=2$ — при опирании тетраэдра вершиной; $n=1$ — при опирании тетраэдра углом основания.

Расчетные сопротивления алюминиевого сплава 1915Т, согласно прил. 2:

$$R_y = 200 \text{ МПа и } R_y = 180 \text{ МПа (в околошовной зоне)}.$$

Пробными попытками по формуле (XII.49), прил. 5 и 9 подбираем сечения стержней верхнего пояса из трубы $\varnothing 83 \times 5 \text{ мм}$:

$$A = 12,3 \text{ см}^2; i = 2,76 \text{ см}; \lambda = 200/2,76 = 72,5; \varphi = 0,471;$$

$$\sigma = \frac{112 \cdot 1000}{0,471 \cdot 12,3 \cdot 100} = 194 \text{ МПа} < R_y = 200 \text{ МПа};$$

стержней сжатых опорных раскосов из трубы $\varnothing 70 \times 4 \text{ мм}$:

$$A = 8,68 \text{ см}^2; i = 2,44 \text{ см}; \lambda = 200/2,44 = 82; \varphi = 0,369;$$

$$\sigma = 61 \cdot 1000 / (0,369 \cdot 8,68 \cdot 100) = 192 \text{ МПа} < R_y = 200 \text{ МПа}.$$

Требуемая площадь сечения по формуле (XII.48) максимально растянутых стержней нижнего пояса и растянутых опорных раскосов с учетом снижения прочности алюминиевого сплава в околошовной зоне:

$$A \geq 123 \cdot 1000 / (180 \cdot 100) = 6,83 \text{ см}^2.$$

Принимаем трубу $\varnothing 60 \times 4 \text{ мм}$ с $A = 7,03 \text{ см}^2$.

§ XIII.3. СЕТЧАТЫЙ СВОД

Сетчатым сводом перекрывают тренировочный хоккейный корт с размером ледяного поля $30 \times 61 \text{ м}$ (рис. XIII.3). Пролет свода 36 м, стрела подъема 9 м. Поверхность свода образована сеткой из равносторонних треугольников с размером стороны ячейки 3,011 м. Материал стержней — стальные электросварные трубы из стали марки ВСтЗпс по ГОСТ 10705—80. Стержни можно соединять с помощью монтажной сварки. Конструкция узла может быть любой. Кровельное ограждение прозрачное с применением полиэфирного стеклопластика по деревянной обрешетке. Место строительства — Челябинск.

Вычисляем по формулам (XII.2) основные геометрические параметры свода:

радиус кривизны оси свода

$$R = (36^2 + 4 \cdot 9^2) / (8 \cdot 9) = 22,5 \text{ м};$$

центральный угол от конька до опоры свода

$$\varphi_0 = \text{Arcsin} [36 / (2 \cdot 22,5)] = 53,13^\circ;$$

длина дуги свода

$$L = 3,14159 \cdot 22,5 \cdot 53,13 / 90 = 41,728 \text{ м}.$$

Нормативная нагрузка от собственной массы несущей конструкции свода по формуле (XII.3):

$$g_{с.м}^H = 6 \cdot 36 = 216 \text{ Н/м}^2.$$

Полиэфирный стеклопластик с волной 200/54

Деревянная обрешетка из брусков 100×50 мм

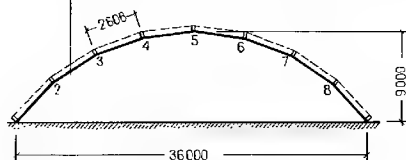


Рис. XIII.3. Поперечный разрез кровельного перекрытия с сводом (пример)

Нормативная нагрузка на свод от кровельного ограждения (стеклопластик и деревянных прогонов):

$$g_{к.о} = (0,0025 \cdot 1400 + 0,100 \cdot 0,050 \cdot 500 / 2,608) 10 = 45 \text{ Н/м}^2.$$

Нормативная и расчетная постоянная нагрузка на свод:

$$g^H = 216 + 45 = 261 \text{ Н/м}^2;$$

$$g = 216 \cdot 1,1 + 45 \cdot 1,1 = 287 \text{ Н/м}^2.$$

Определяем коэффициент перегрузки для снега:

$$p_0 = 1000 \text{ Н/м}^2 \text{ (III снеговой район СССР);}$$

$$g^H/p_0 = 261/1000 = 0,261 < 0,4; n = 1,6.$$

Скоростной напор ветра и его изменение для городской застройки по СНиП [50] для II ветрового района СССР:

$$g_0 = 350 \text{ Н/м}^2; K = 0,65.$$

Наибольшее сочетание усилий оказывается при действии треугольной снеговой нагрузки и в сечении, расположенном в четверти дуги свода, поэтому только для данного случая приводим вычисление усилий. Координаты сечения свода в четверти дуги:

$$\varphi = \varphi_0/2 = 53,13/2 = 26,565^\circ;$$

$$x = R [\sin (3\varphi/2) - \sin \varphi] = 22,5 (0,6407 - 0,4472) = 4,354 \text{ м};$$

$$y = f - R [1 - \cos (3\varphi/2)] = 9 - 22,5 (1 - 0,7678) = 3,776 \text{ м}.$$

Усилия в единичной полоске свода от постоянной нагрузки определяем формулам (XII.6), (XII.7) и (XII.11):

$$k = \frac{1}{[1 + 1,4488 \cdot 36^2 / (4 \cdot 9)^2] 10^{-4}} = 0,999;$$

$$H = \left[\frac{0,9273 \cdot 36}{2} - 22,5 (1 - 0,600) \right] \frac{0,287 \cdot 22,5}{9} 0,999 = 5,513 \text{ кН};$$

$$V = 0,287 \cdot 0,9273 \cdot 22,5 = 5,988 \text{ кН};$$

$$Q = \pi R (\varphi/180) g = 3,1416 \cdot 22,5 (26,565/180) 0,287 = 2,994 \text{ кН};$$

$$M_0 = V_x + g R^2 [\cos \varphi_0 - \cos \varphi + (\varphi_0 - \varphi) \sin \varphi] = 5,988 \cdot 4,354 + 0,287 \cdot 22,5^2 [0,600 - 0,8944 + (0,9273 - 0,4636) 0,4472] = 13,426 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$N = 5,513 \cdot 0,8944 + 2,994 \cdot 0,4472 = 6,27 \text{ кН};$$

$$M = 13,426 - 5,513 \cdot 3,776 = -7,39 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Усилия в единичной полоске свода при треугольной снеговой нагрузке находим по формулам (XII.4), (XII.9) и (XII.11):

$$c_2 = 2,2; p_2 = 1000 \cdot 2,2 \cdot 1,6 = 3520 \text{ Н/м}^2;$$

$$a = R (\sin \varphi_0 - \sin 50^\circ) = 22,5 (0,800 - 0,766) = 0,765 \text{ м};$$

$$\alpha = a/l = 0,765/36 = 0,02125; H = 0,0342 (3,52 \cdot 36^2/19) 0,999 (1 - 2 \cdot 0,02125 + 8 \cdot 0,02125^2) = 16,645 \text{ кН};$$

$$V_A = (1/48) 3,52 \cdot 36 (11 - 26 \cdot 0,02125 + 8 \cdot 0,02125^2) = 27,591 \text{ кН};$$

$$Q = V_A - \frac{(x-a)(l-a-x)}{l-2a} p_2 =$$

$$= 27,591 - \frac{(4,354 - 0,765)(36 - 0,765 - 4,354)}{36 - 2 \cdot 0,765} 3,52 = 16,273 \text{ кН};$$

$$M_6 = V_A x - \frac{(x-a)^2 (3l-4a-2x)}{6(l-2a)} p_2 = 27,591 \cdot 4,354 -$$

$$- \frac{(4,354 - 0,765)^2 (3 \cdot 36 - 4 \cdot 0,765 - 2 \cdot 4,354)}{6(36 - 2 \cdot 0,765)} 3,52 = 99,034 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$N = 16,645 \cdot 0,8944 + 16,273 \cdot 0,4472 = 22,16 \text{ кН};$$

$$M = 99,034 - 16,645 \cdot 3,776 = 35,18 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Расчетные усилия в своде от одновременного действия постоянной и снеговой нагрузок составляют:

$$N = 6,27 + 22,16 = 28,43 \text{ кН};$$

$$M = -7,39 + 36,18 = 28,79 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Продольное сжимающее усилие в одном стержне свода вычисляем по формуле (XII.12):

$$N_1 = 28,43 \cdot 3,011 / (2 \sin 60^\circ) = 49,42 \text{ кН}.$$

Изгибающий момент, приходящийся на один стержень свода:

$$M_1 = (M a/2) \cos 30^\circ = (28,79 \cdot 3,011/2) 0,866 = 37,54 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Для внецентренно-сжатого стержня из условия устойчивости по формуле (XII.50) и прил. 9 подбираем электросварную трубу $\varnothing 194 \times 5,5$ мм:

$$A = 32,6 \text{ см}^2; i = 6,67 \text{ см};$$

$$W = \pi (d^4 - d^4) / (32d) = 3,1416 (19,4^4 - 18,3^4) / (32 \cdot 19,4) = 149 \text{ см}^3;$$

по табл. 74 СНиП [51]:

$$\varphi_e = 0,0744;$$

$$\sigma = 49\,420 / (0,0744 \cdot 32,6 \cdot 1000) = 204 \text{ МПа} < R_y = 215 \text{ МПа}.$$

Проверяем устойчивость сетчатого свода по условию (XII.1):

$$\alpha^2 / (R i) = 301,1^2 / (2250 \cdot 6 \cdot 67) = 6,04 < 9,$$

следовательно, прощелкивания узлов при жестком соединении стержней не будет.

Вычисляем критическую силу в своде по формуле (XII.14):

$$E = 206 \text{ ГПа}; J_x = 2 \frac{3,1416 (19,4^4 - 18,3^4)}{64} = 2896 \text{ см}^4; \mu = 0,575;$$

$$N_{кр} = \frac{3,1416^2 \cdot 2,06 \cdot 10^5 \cdot 2896 \cdot 10^{-1}}{(0,575 \cdot 4172,8)^2} = 102,3 \text{ кН} > N = 28,43 \cdot 3,011 = 85,6 \text{ кН},$$

следовательно, устойчивость свода обеспечивается.

§ XIII.4. РЕШЕТЧАТЫЕ СКЛАДКИ НА КРИВОЛИНЕЙНОМ ПЛАНЕ

Требуется перекрыть решетчатыми складками выставочный павильон криволинейным планом, приняв за основу схему покрытия, показанную на рис. XII.3,г. Радиус дуги внутреннего ряда колонн 20 м, наружного ряда — 40 м. Материал стержней — сталь марки ВСтЗпсб по ГОСТ 380—71*. Пояса складок могут быть выполнены из прокатных уголков, решетка — из электросварных труб. Кровельное ограждение из трехслойных алюминиевых плит заделкой стыков мягким герметиком. Место строительства — II снеговой район СССР.

Назначаем высоту поперечного сечения складки по середине пролета:

$$h = 20/15 = 1,333 \text{ м.}$$

Ширина складки по середине пролета при условии использования для поясов прокатных уголков (равнобедренный треугольник в поперечном сечении)

$$b = 2 \cdot 1,333 = 2,666 \text{ м.}$$

Определяем размеры поперечного сечения складки по внутреннему и наружному рядам колонн:

$$b_1 = 2,666 \cdot 20/30 = 1,777 \text{ м; } h_1 = b_1/2 = 1,777/2 = 0,888 \text{ м;}$$

$$\sqrt{h_1^2 + (b_1/2)^2} = \sqrt{0,888^2 + 0,888^2} = 1,256 \text{ м;}$$

$$b_2 = 2,666 \cdot 40/30 = 3,555 \text{ м; } h_2 = 3,555/2 = 1,777 \text{ м;}$$

$$\sqrt{h_2^2 + (b_2/2)^2} = \sqrt{1,777^2 + 1,777^2} = 2,513 \text{ м.}$$

Принимаем размер панели нижнего пояса складки 2,5 м и вычерчиваем расчетно-геометрическую схему грани складки (рис. XIII.4).

Нормативная и расчетная нагрузки от собственной массы решетчатой складки по формуле (XII.3) и собственной массы трехслойной алюминиевой плиты:

$$g^n = 10 \cdot 20 + 80 = 280 \text{ Н/м}^2; \quad g = 200 \cdot 1,1 + 80 \cdot 1,1 = 308 \text{ Н/м}^2.$$

Расчетная снеговая нагрузка на 1 м² покрытия по формуле (XII.4):

$$p_0 = 700 \text{ Н/м}^2; \quad q^n/p_0 = 280/700 = 0,4; \quad n = 1,6;$$

$$p = 700 \cdot 1,0 \cdot 1,6 = 1120 \text{ Н/м}^2.$$

Складка в плане имеет форму трапеции, поэтому значение нагрузки на узлы изменяется вдоль пролета. Вычисление сосредоточенной нагрузки на складку производим в табличной форме, используя формулу (XII.16) и зависимость между вертикальной нагрузкой и составляющей в плоскости грани складки $T = P/\sqrt{2}$.

Посчет нагрузки на складку

Грузовая площадь, м ² , для нагрузки		Нагрузка на узел складки, кН			Нагрузка на узел грани, кН
постоянной	снеговой	постоянная	снеговая	суммарная	
(2,513+2,434) × × 1,25 · 1/2	(3,555 + 3,443) × × 1,25 · 1/4	0,95	2,45	P ₁ =3,40	T ₁ =2,40
2,356 · 2,5	3,332 · 2,5/2	1,81	4,66	P ₂ =6,47	T ₂ =4,57
2,199 · 2,5	3,110 · 2,5/2	1,69	4,35	P ₃ =6,04	T ₃ =4,27
2,042 · 2,5	2,888 · 2,5/2	1,57	4,04	P ₄ =5,61	T ₄ =3,97
1,885 · 2,5	2,666 · 2,5/2	1,45	3,73	P ₅ =5,18	T ₅ =3,66
1,728 · 2,5	2,444 · 2,5/2	1,33	3,42	P ₆ =4,75	T ₆ =3,36
1,571 · 2,5	2,222 · 2,5/2	1,21	3,11	P ₇ =4,32	T ₇ =3,05
1,414 · 2,5	1,999 · 2,5/2	1,09	2,80	P ₈ =3,89	T ₈ =2,75
(1,335+1,256) × × 1,25 · 1/2	(1,888+1,777) × × 1,25 · 1/4	0,50	1,28	P ₉ =1,78	T ₉ =1,24

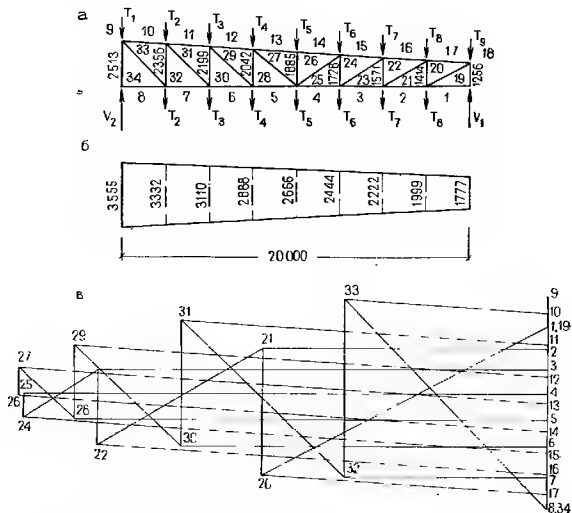


Рис. XIII.4. Определение усилий в стержнях складки (пример)

а — расчетно-геометрическая схема; б — размеры складки в плане; в — диаграмма усилий

Вычисляем опорные реакции складки:

$$V_1 = (2 \cdot 4,57 \cdot 2,5 + 2 \cdot 4,27 \cdot 5 + 2 \cdot 3,97 \cdot 7,5 + 2 \cdot 3,66 \cdot 10 + 2 \cdot 3,36 \cdot 12,5 + \\ + 2 \cdot 3,05 \cdot 15 + 2 \cdot 2,75 \cdot 17,5 + 1 \cdot 26 \cdot 20) / 20 = 24,76 \text{ кН};$$

$$V_2 = (2 \cdot 2,75 \cdot 2,5 + 2 \cdot 3,05 \cdot 5 + 2 \cdot 3,35 \cdot 7,5 + 2 \cdot 3,66 \cdot 10 + 2 \cdot 3,97 \cdot 12,5 + \\ + 2 \cdot 4,27 \cdot 15 + 2 \cdot 4,57 \cdot 17,5 + 2 \cdot 40 \cdot 20) / 20 = 30,16 \text{ кН}.$$

Усилия в стержнях грани складки определяем построением диаграммы Максвелла — Кремоны (см. рис. XIII.4).

Подбор сечений стержней складки аналогичен расчету обычной стропильной фермы. Ниже приводим только отдельные результаты на примере подбора сечений наиболее нагруженных элементов складки:

нижний пояс:

$$N_{\max} = 2 N_{25-4} - 2 \cdot 75 = 150 \text{ кН};$$

равнополочный уголок 75×5 мм; $A=7,39 \text{ см}^2$; $\gamma_c=0,95$;

$$\sigma = 150\,000 / (7,39 \cdot 0,95 \cdot 100) = 214 \text{ МПа} \cdot R_y = 235 \text{ МПа}.$$

верхний пояс:

$$N_{\max} = 2 N_{27-13} = 2 \cdot 76 = 152 \text{ кН};$$

$$l = \sqrt{2500^2 + (2042 - 1885)^2} = 2505 \text{ мм};$$

равнополочный уголок 110×7 мм; $A = 15,2$ см²; $i_{\min} = 2,19$ см;
 $\lambda = 250,5/2,19 = 114$; $\varphi = 0,461$; $\gamma_c = 0,95$;
 $\sigma = 152\,000 / (0,461 \cdot 15,2 \cdot 0,95 \cdot 100) = 228$ МПа.

Первый раскос:

$$N_{\max} = N_{20-19} = 46 \text{ кН};$$

электросварная труба $\varnothing 45 \times 1,6$ мм, $A = 2,18$ см²;

$$\sigma = 46\,000 / (2,18 \cdot 0,95 \cdot 100) = 222 \text{ МПа}.$$

Опорная стойка:

$$N_{\max} = V_2 = 30,16 \text{ кН};$$

электросварная труба $\varnothing 63,5 \times 1,6$ мм; $A = 3,11$ см²; $i = 2,19$ см;

$$\lambda = 251,3/2,19 = 115$$
; $\varphi = 0,460$; $\gamma_c = 0,95$;

$$\sigma = 30\,160 / (0,460 \cdot 3,11 \cdot 0,95 \cdot 100) = 222 \text{ МПа}.$$

§ XIII.5. ДВУХПОЯСНОЙ СЕТЧАТЫЙ КУПОЛ

Подберем сечение стержней и проверим устойчивость двухпоясного куполообразного покрытия, показанного на рис. XII.29. Материал стержней — трубы из алюминиевого сплава 1925Т. Кровля из светопрозрачного полиэфирного стеклопластика по деревянным прогонам. Место строительства — Одесса.

Назначаем расстояние между поясами купола:

$$h = D/100 = 100/100 = 1 \text{ м}.$$

Сетчатую конструкцию купола собираем из тетраэдров с размером поясных стержней до 2 м. Тетраэдры вершинами обращены внутрь купола, нижняя поясная сетка имеет треугольные ячейки с максимальным размером:

$$a = 2 \cdot 2 \cos 30^\circ = 3,464 \text{ м}.$$

Постоянную нагрузку от собственной массы купола находим по формуле (XII.3):

$$g_{с.м}^H = 4 \cdot 100 = 400 \text{ Н/м}^2.$$

Принимаем нагрузку от кровли по примеру XIII.3, определяем полную постоянную нагрузку:

$$g^H = 400 + 45 = 445 \text{ Н/м}^2; \quad g = 445 \cdot 1,1 = 490 \text{ Н/м}^2.$$

Вычисляем снеговую нагрузку на купол по формуле (XII.4) для I снегового района СССР:

$$p_0 = 500 \text{ Н/м}^2; \quad g^H/p_0 = 445/500 = 0,89;$$

$$n = 1,455; \quad c_1 = 0,4 \text{ (см. рис. XII.33, в)}.$$

$$p = 500 \cdot 0,4 \cdot 1,455 = 291 \text{ Н/м}^2.$$

Расчетная ветровая нагрузка на 1 м² вертикальной плоскости на уровне основания купола по формуле (XII.5) для III ветрового района составляет

$$q_0 = 450 \text{ Н/м}^2; \quad q_B^0 = 450 \cdot 1,2 \cdot 1 = 540 \text{ Н/м}^2.$$

Определяем сжимающие меридиональные усилия в куполе при угле $\varphi = 60^\circ$ от постоянной нагрузки по формуле (XII.18)

$$N_1 = -0,490 \cdot 49,5 / (1 + 0,5) = -16,17 \text{ кН/м};$$

от снеговой нагрузки по формуле (XII.20)

$$N_1 = -0,291 \cdot 49,5 / 2 = -7,20 \text{ кН/м};$$

от ветра по эпюре N_1 на рис. XII.38,б

$$N_1 = -0,160 \cdot 0,54 \cdot 49,5 = -4,28 \text{ кН/м};$$

от всех нагрузок с коэффициентом сочетания 0,9 для снега и ветра

$$N_1 = -16,17 - 0,9 (7,2 + 4,28) = -26,5 \text{ кН/м}.$$

Определяем растягивающие кольцевые усилия внизу купола: от постоянной нагрузки по эпюре N_2 на рис. XII.37,б

$$N_2 = 0,49 \cdot 49,5 = 24,26 \text{ кН/м};$$

от снеговой нагрузки по эпюре N_2 на рис. XII.37,б

$$N_2 = 0,291 \cdot 49,5/2 = 7,2 \text{ кН/м};$$

от ветра по эпюре N_2 на рис. XII.38,б

$$N_2 = 0,54 \cdot 49,5 = 26,73 \text{ кН/м};$$

от сочетания всех нагрузок

$$N_2 = 24,26 + 0,9 (7,2 + 26,73) = 54,8 \text{ кН/м}.$$

Полагая равномерное распределение усилий между поясными сетками купола, по формулам (XII.24) и (XII.25) вычисляем усилия в стержнях, расположенных по меридиану:

$$P_1 = -26,5 \cdot 3,464/2 = -45,9 \text{ кН};$$

расположенных по кольцу

$$P_2 = 54,8 \cdot 3,464/2 = 94,9 \text{ кН}.$$

По прил. 2 для алюминиевого сплава 1925Т находим расчетное сопротивление $R_y = 175 \text{ МПа}$. По формуле (XII.49) и прил. 9 для сжатых стержней подбираем трубу с сечением $\varnothing 89 \times 4 \text{ мм}$:

$$A = 10,7 \text{ см}^2; \quad i = 3,01 \text{ см}; \quad \lambda = 346,4/3,01 = 115; \quad \varphi = 0,242;$$

$$\sigma = 45\,900 / (0,242 \cdot 10,7 \cdot 100) = 177 \text{ МПа},$$

что больше расчетного сопротивления на 1,3% и является допустимым.

По формуле (XII.48) для растянутых стержней подбираем трубу с сечением $\varnothing 89 \times 2 \text{ мм}$ ($A = 5,47 \text{ см}^2$):

$$\sigma = 94\,900 / (5,47 \cdot 100) = 173 \text{ МПа}.$$

Проверяем устойчивость купола по формуле (XII.27):

$$E = 71\,000 \text{ МПа};$$

$$P_{кр} = 0,8 (71\,000 \cdot 10,7 \cdot 50 / 4950) 100 = 614 \cdot 10^3 \text{ Н} > P_1 = 45,9 \text{ кН}.$$

Следовательно, общая устойчивость купола обеспечивается.

§ XIII.6. СЕТЧАТАЯ ПОЛОГАЯ ОБОЛОЧКА

Центральный колхозный рынок перекрывают решетчатой однопоясной полой оболочкой размером в плане $100 \times 100 \text{ м}$ (рис. XIII.5). Стрела подъема оболочки составляет $1/8$ часть пролета. Поясные ячейки квадратные. Материал

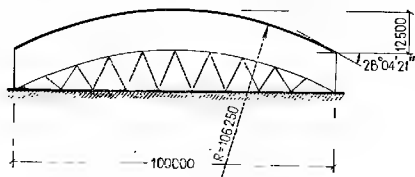


Рис. XIII.5. Схема сетчатой полой оболочки для перекрытия рынка (поперечный разрез)

для поясных стержней оболочки — трубы квадратного сечения из стали мар. ВСтЗпсб по ГОСТ 380—71*. Состав покрытия тот же, что в примере со стержневой плитой из пентаэдров. Место строительства — Свердловск.

Радиус кривизны покрытия, центральный угол и длину дуги в поперечном сечении покрытия определяем по формулам (XII.2):

$$R = (100^2 + 4 \cdot 12,5^2) / (8 \cdot 12,5) = 106,25 \text{ м};$$

$$\varphi_0 = \text{Arc sin } (100/2 \cdot 106,25) = 28,0725^\circ;$$

$$L = 3,1416 \cdot 106,25 \cdot 28,0725/90 = 104,116 \text{ м}.$$

Вдоль дуги в поперечном сечении оболочки назначаем 34 ячейки, в этом случае размер ячейки составляет:

$$a = L/n = 104,116/34 = 3,062 \text{ м}.$$

Распределение снега на покрытии учитываем коэффициентом c_1 к формуле (XII.4):

$$c_1 = 100/(8 \cdot 12,5) = 1.$$

Расчетная нагрузка на 1 м^2 покрытия с учетом снегового покрова для района СССР:

$$q = 1474 + 1 \cdot 1000 \cdot 1,4 = 2874 \text{ Н/м}^2 = 2,87 \text{ кН/м}^2.$$

Меридиональные и кольцевые усилия в центральной части оболочки вычисляем по формулам (XII.29), (XII.34):

$$N_1 = N_2 = 2,87 \cdot 106,25/2 \cdot 3,062 = 466,9 \text{ кН},$$

где 3,062 — размер стороны поясной ячейки, м.

Пробными попытками из условия устойчивости поясных стержней по формуле (XII.49) подбираем трубу холодногнутую сварную квадратного сечения с размером сторон $200 \times 200 \text{ мм}$ и стенкой 5 мм (см. прил. II):

$$A = 37,9 \text{ см}^2; \quad i = 7,9 \text{ см}; \quad \lambda = 306,2/7,9 = 38,8; \quad \varphi = 0,898;$$

$$\sigma = 466900/(0,898 \cdot 37,9 \cdot 100) = 137 \text{ МПа} < R_y = 225 \text{ МПа}.$$

Сжимающие кольцевые усилия имеют максимальное значение вблизи контура покрытия, их значение определяем по формулам (XII.30), (XII.34):

$$N_2 = 2,87 \cdot 106,25 \cdot 3,062 = 933,7 \text{ кН}.$$

Для поясных стержней вблизи контура оболочки по формуле (XII.49) прил. II подбираем трубу квадратного сечения с размером сторон $200 \times 200 \text{ мм}$ и стенкой 7 мм:

$$A = 51,9 \text{ см}^2; \quad i = 7,79 \text{ см}; \quad \lambda = 306,2/7,79 = 39,3; \quad \varphi = 0,895;$$

$$\sigma = 933700/(0,895 \cdot 51,9 \cdot 100) = 201 \text{ МПа}.$$

Меридиональные и кольцевые усилия в углах оболочки вычисляем по формуле (XII.33):

$$N_2 = N_1 = 1,71 \cdot 2,87 \cdot 106,25 = 521,4 \text{ кН/м}.$$

Максимальное растягивающее усилие в диагональном стержне в угловой части оболочки вычисляем по формуле (XII.41):

$$P_2 = (3/\sqrt{2}) 521,4 \cdot 3,062 = 3387 \text{ кН}.$$

По формуле (XII.48) для восприятия растягивающих усилий в угловой части требуется сечение стержня:

$$\gamma_c = 0,95;$$

$$A \geq 3387000/(225 \cdot 0,95 \cdot 100) = 158,5 \text{ см}^2.$$

По прил. 11 принимаем три трубы квадратного сечения с размером сторон 200×200 мм и стенкой 8 мм:

$$A = 3 \cdot 58,7 = 176,1 \text{ см}^2.$$

Общую устойчивость сетчатой оболочки проверяем по формуле (XII.36):

$$E = 206 \text{ ГПа};$$

$$q_{кр} = 0,16 \frac{2,06 \cdot 10^8 \cdot 37,9 \cdot 7,9}{306,2 \cdot 10625} = 3,03 \text{ кН/м}^2 > q = 2,87 \text{ кН/м}^2.$$

В данном конкретном случае при учете только равномерно распределенной нагрузки устойчивость оболочки обеспечивается. На стадии реального проектирования оболочку будут проверять еще на устойчивость при воздействии односторонних вертикальных и ветровой нагрузок. В этой связи следует иметь в виду, что общая устойчивость сетчатой пологой оболочки на случай любого воздействия нагрузок обеспечивается при отношении высоты сечения стержня к пролету не менее 1/300.

По формуле (XII.1) проверим оболочку на прощелкивание узлов

$$306,2^2 / (10625 \cdot 7,9) = 1,12 < 9.$$

Следовательно, и эта устойчивость вполне обеспечивается.

В криволинейном бруске действует только усилие N_k , максимальное значение которого определяем по формуле (XII.35):

$$N_k = (7/48) 521,4 \cdot 100 = 7604 \text{ кН}.$$

Находим требуемую площадь сечения криволинейного бруса по формуле (XII.48) при условии центрирования сетчатой оболочки по его продольной оси:

$$A \geq 7604000 / (210 \cdot 100) = 362 \text{ см}^2.$$

Принимаем сечение криволинейного бруса в виде сварного двутавра с высотой по аналогии с контурным ребром и контурной аркой:

$$h \approx 100/60 = 1,667 \text{ м}; \quad h_{ст} = 160 \text{ см}; \quad t_{ст} = 160/100 = 1,6 \text{ см};$$

$$b_{п} = 160/4 = 40 \text{ см}; \quad t_{п} = (352 - 160 \cdot 1,6) / (2 \cdot 40) = 1,4 \text{ см};$$

$$A = 160 \cdot 1,6 + 2 \cdot 40 \cdot 1,4 = 368 \text{ см}^2.$$

§ XIII.7. СЕТЧАТЫЙ ЧЕТЫРЕХЛЕПЕСТКОВЫЙ ГИПАР

Выполним статический и конструктивный расчеты гиперболического параболоида в покрытии спортивного зала, показанного на рис. XII.28. Размеры гипара в плане 53×53 м, стрела подъема коньковых ребер 18 м. Расчетная нагрузка на горизонтальную проекцию покрытия составляет $2,06 \text{ кН/м}^2$. Материал стержней — прокатные уголки из стали марки ВСт3псб по ГОСТ 380—71*.

Сетку стержней в лепестке гипара назначаем следующим образом. Коньковые ребра разбиваем на восемь равных частей и располагаем стержни вдоль прямолинейных образующих в двух направлениях. Диагональные стержни располагаем вдоль вогнутости оболочки (аналогично рис. II.46а):

$$a = 53 / (2 \cdot 8) = 3,312 \text{ м}.$$

Коньковые и наклонные ребра назначаем сквозного коробчатого сечения с размерами:

по горизонтали

$$h \geq 53/60 = 0,88 \text{ м}; \quad h = 90 \text{ см};$$

по вертикали

$$b = 90/2 = 45 \text{ см}.$$

Растягивающие и сжимающие усилия в оболочке находим по формуле (XII.39):

$$N_1 = -N_2 = (2,06 \cdot 26,5^2) / (8 \cdot 4,5) = 40,2 \text{ кН/м},$$

где $l = 0,5 \cdot 53 = 26,5 \text{ м}$; $f = 18,0/4 = 4,5 \text{ м}$.

Усилия в стержнях вдоль образующих и диагоналей вычисляем по формулам (XII.41):

$$P_0 = -40,2 \cdot 3,312 = -133 \text{ кН}; \quad P_d = (3/\sqrt{2}) 40,2 \cdot 3,312 = 282 \text{ кН}.$$

Для стержней вдоль образующих по формуле (XII.49) подбираем сечение из двух уголков $90 \times 6 \text{ мм}$:

$$A = 2 \cdot 10,6 = 21,2 \text{ см}^2; \quad i_x = 2,78 \text{ см}; \quad \lambda = 331,2/2,78 = 119;$$

$$\varphi = 0,430; \quad \gamma_c = 0,95;$$

$$\sigma = 133\,000 / (0,430 \cdot 21,2 \cdot 0,95 \cdot 100) = 15 \text{ МПа}.$$

Меньшее сечение назначать нельзя, так как гибкость несущих сжатых стержней ограничивается предельным значением 120.

Для растянутых диагональных стержней по формуле (XII.48) подбираем уголок $90 \times 8 \text{ мм}$ ($A = 13,9 \text{ см}^2$):

$$\sigma = 282\,000 / (13,9 \cdot 0,95 \cdot 100) = 214 \text{ МПа} < R_y = 235 \text{ МПа}.$$

Максимальное сжимающее усилие в наклонном ребре определяем по формуле (XII.43):

$$\cos \alpha = \frac{26,5}{\sqrt{18,0^2 + 26,5^2}} = 0,8272; \quad N_0 = \frac{40,2 \cdot 26,5}{0,8272} = 1288 \text{ кН}.$$

Максимальное растягивающее усилие в коньковом ребре находим по формуле (XII.45):

$$N_K = 2 \cdot 40,2 \cdot 26,5 \cdot 0,85 = 1811 \text{ кН}.$$

Сечение наклонного ребра подбираем из условия прочности без учета коэффициента φ :

$$A \geq 1\,288\,000 / (235 \cdot 0,95 \cdot 100) = 57,7 \text{ см}^2.$$

чему соответствуют четыре уголка $100 \times 8 \text{ мм}$ ($A = 4 \cdot 15,6 = 62,4 \text{ см}^2$).

Сечение конькового ребра принимаем из четырех уголков $125 \times 9 \text{ мм}$ ($A = 4 \cdot 22 = 88 \text{ см}^2$):

$$\sigma = 1\,811\,000 / (88 \cdot 0,95 \cdot 100) = 217 \text{ МПа} < R_y = 235 \text{ МПа}.$$

Расчетные сопротивления стали и ее соединений, МПа

Напряженное состояние	Условное обозначение	Сталь марки						
		ВСт3 по ГОСТ	ВСт3 по ТУ	09Г2	10ХНДП 10ХСНД 09Г2С	14Г2АФ	16Г2АФ 18Г2АФпс	12Г2СМФ 12ГН2МФАЮ

Расчетные сопротивления прокатной стали и сварных соединений при физическом контроле качества швов

Растяжение, сжатие, изгиб	R_v	205— 235	210— 280	280— 290	330— 355	370	400	515
---------------------------	-------	-------------	-------------	-------------	-------------	-----	-----	-----

Расчетные сопротивления сварных угловых швов

Срез по металлу шва	R_{wf}	180	200	200	215	240	280	340
Срез по металлу границы сплавления	R_{wz}	165	160— 175	200	210— 240	245	265	310

Расчетные сопротивления смятию элементов конструкций в болтовых соединениях

Смятие при болтах повышенной точности	R_{bp}	400— 410	385— 445	540	600— 730	750	870	—
Смятие при болтах нормальной и грубой точности	R_{bp}	355— 370	350— 400	485	535— 645	665	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчетные сопротивления алюминиевых сплавов и их соединений, МПа

Напряженное состояние	Условное обозначение	Термически неупрочняемые сплавы марок		Термически упрочняемые сплавы марок			
		АМг2М	АМг2П	АД31Т	АД31ТЛ	1925Т	1915Т

Расчетные сопротивления сплавов

Растяжение, сжатие, изгиб	R_v	70	150	55	150	175	200
---------------------------	-------	----	-----	----	-----	-----	-----

Расчетные сопротивления сплавов в околошовной зоне при аргонодуговой сварке

Растяжение, сжатие, изгиб	R_v	65	65	55	80	—	170
---------------------------	-------	----	----	----	----	---	-----

Расчетные сопротивления сварных швов, выполняемых аргонодуговой сваркой

Срез металла шва	R_{wf}	45	45	45	45	—	110
------------------	----------	----	----	----	----	---	-----

Расчетные сопротивления смятию элементов конструкций в болтовых соединениях

Смятие	R_{bp}	100	220	80	220	250	290
--------	----------	-----	-----	----	-----	-----	-----

**Расчетные сопротивления болтов на растяжение, срез
и механические свойства высокопрочных болтов, МПа**

Напряженное состояние	Условное обозначение	Стальные болты класса прочности				Алюминиевые болты сплава Мг5П	
		4.6	5.6	6.6	8.8	АМг5П	1
Растяжение	R_{bt}	175	210	250	400	125	1
Срез в одноболтовом соединении	R_{bs}	150	190	230	320	80	

Примечание. Для стальных болтов первое число в классе прочности умноженное на 100, указывает значение минимального временного сопротивления в МПа; второе число, умноженное на 10, указывает отношение предела текучести к временному сопротивлению в %; произведение чисел, умноженное на 10, указывает значение предела текучести в МПа.

Диаметр болта, мм	Наименьшее временное сопротивление R_{bnp} высокопрочного болта из стали марки		
	40X «селект»	38ХС «селект» 40ХФА «селект»	30ХЗМФ
От 16 до 27	1100	1350	1550
30	950	—	1200
35	750	—	1100
42	650	—	1000
48	600	—	900

Сортамент болтов с метрической резьбой (стандарты СЭВ 180-75, 182-75)

Наружный диаметр, мм	Площадь поперечного сечения A_{bn} , см ²	Наружный диаметр, мм	Площадь поперечного сечения A_{bn} , см ²	Наружный диаметр, мм	Площадь поперечного сечения A_{bn} , см ²
12	0,837	24	3,52	56	20,5
14	1,152	27	4,59	64	26,9
16	1,57	30	5,6	72	34,7
18	1,92	36	8,26	80	43,5
20	2,45	42	11,2	90	56
22	3,03	48	14,72	100	70,2

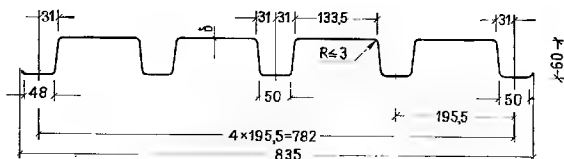
Коэффициент φ продольного изгиба центрально-сжатых элементов

Гибкость элемента $\lambda = l_{eff}/i$	Элементы из стали с расчетным сопротивлением R_y , МПа							Элементы из алюминиевых сплавов марок				
	200	240	260	320	360	400	520	АМг2М	АМг2Л, АД31Т1	1925Т	1915Т	
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
10	0,988	0,987	0,985	0,984	0,983	0,982	0,979	1	1	1	1	
20	0,967	0,962	0,959	0,955	0,952	0,949	0,941	0,982	0,924	0,915	0,91	
30	0,939	0,931	0,924	0,917	0,911	0,905	0,891	0,915	0,85	0,838	0,83	
40	0,906	0,894	0,883	0,873	0,863	0,854	0,832	0,86	0,785	0,77	0,758	
50	0,869	0,852	0,836	0,822	0,809	0,796	0,764	0,812	0,717	0,696	0,676	
60	0,827	0,805	0,785	0,766	0,749	0,721	0,65	0,766	0,645	0,615	0,59	
70	0,782	0,754	0,724	0,687	0,654	0,623	0,542	0,717	0,565	0,53	0,5	
80	0,734	0,686	0,641	0,602	0,566	0,532	0,442	0,665	0,49	0,44	0,385	
90	0,665	0,612	0,565	0,522	0,483	0,447	0,349	0,608	0,392	0,348	0,305	
100	0,599	0,542	0,493	0,448	0,408	0,369	0,286	0,555	0,318	0,282	0,246	
110	0,537	0,478	0,427	0,381	0,338	0,306	0,239	0,506	0,263	0,233	0,204	
120	0,479	0,419	0,366	0,321	0,287	0,26	0,203	0,458	0,221	0,196	0,171	
130	0,425	0,364	0,313	0,276	0,247	0,223	0,175	0,415	0,188	0,167	0,146	
140	0,376	0,315	0,272	0,24	0,215	0,195	0,153	0,362	0,162	0,144	0,126	
150	0,328	0,276	0,239	0,211	0,189	0,171	0,134	0,313	0,141	0,125	0,11	
160	0,29	0,244	0,212	0,187	0,167	0,152	0,12	—	—	—	—	
170	0,259	0,218	0,189	0,167	0,15	0,136	0,107	—	—	—	—	
180	0,233	0,196	0,17	0,15	0,135	0,123	0,097	—	—	—	—	

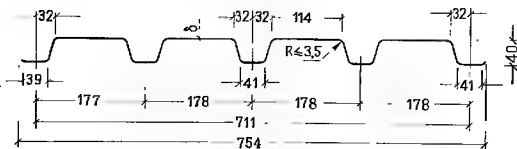
ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Профили стальные оцинкованные гнутые с трапецевидной формой гофра для строительства по ТУ 34-13-5914-79 и ТУ 36-1929-76

Профиль Н-60



Профиль Н-40



Профиль по ТУ 34-13-5914-79 изготавливает куйбышевский завод «Электросталь», по ТУ 36-1929-76 — Киреевский завод ограждающих конструкций. Орский завод металлоконструкций.

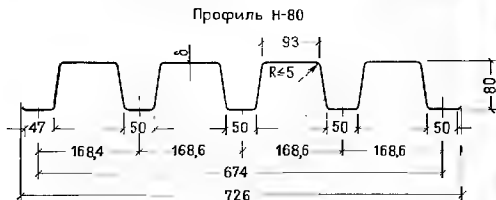
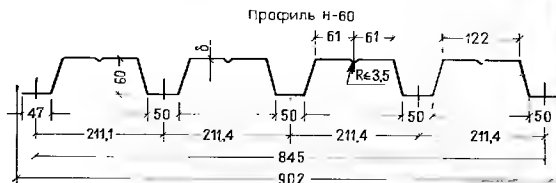
Сталь марки ВСтЗкп по ГОСТ 380—71*. Длина профилей 2—12 м.

Справочные величины

Обозначение профиля	Толщина δ , мм	Момент сопротивления 1 м ширины профиля W , см ³	Момент инерции 1 м ширины профиля I , см ⁴	Масса 1 м: профиля, кг
H79-680-1	1	26,9	127,5	15,3
H60-782-1	1	19,3	69,6	13,3
H60-845-1	1	17,8	64,3	12,3
H60-782-0,9	0,9	16,6	60,4	12
H60-845-0,9	0,9	15,3	55,7	11,1
H60-782-0,8	0,8	13,9	51,4	10,9
H60-845-0,8	0,8	12,8	47,5	10
H40-711-0,8	0,8	8,7	21,1	9,6

ПРИЛОЖЕНИЕ

Профили стальные оцинкованные гнутые с трапециевидной формой гофры для строительства по ТУ 67-199-78



Профили изготавливают Челябинский завод профилированного стального настила и Хабаровский завод алюминиевых конструкций.

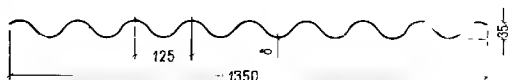
Длина профилей 3—12 м. Сталь марки ВСтЗкп по ГОСТ 380—71*.

Справочные величины

Обозначение профиля	Толщина δ , мм	Момент сопротивления 1 м ширины профиля W , см ³	Момент инерции 1 м ширины профиля J , см ⁴	Масса 1 м ² профиля, кг
H80-660-1	1	41,2	188,5	15,8
H80-674-1	1	34,1	159	15,5
H60-780-1	1	22,4	90,5	13,4
H60-780-0,9	0,9	20,4	82,6	12,1
H60-780-0,8	0,8	18,3	74,8	10,9
H60-845-1	1	22,3	82,7	12,4
H60-845-0,9	0,9	19,2	74,7	11,2
H60-845-0,8	0,8	16,3	66,3	10

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Сортамент профилированных листов из алюминиевых сплавов.

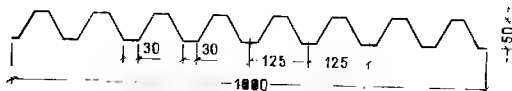


Профилирует Куйбышевский металлургический завод имени В. И. Ленина.

Марки сплавов АМгМ, АМцП, АМгЗМ, АМг6М, АД16М, АД1М. Длина профилей 3—7 м.

Справочные величины

Нормаль завода	Типоразмер профиля	Толщина δ , мм	Масса 1 м ² профиля, кг
ПК-0788-1	125/35	0,8	2,4
		1	3
		1,2	3,6
		1,5	4,5
		1,8	5,4
		2	5,95



Профилирует Воронежский завод строительных конструкций им. Ф. Б. Якубовского.

Марка сплавов АМцП, АМг2П. Длина профилей до 6 м.

Справочные величины

Нормаль завода	Типоразмер профиля	Толщина δ , мм	Момент инерции J , см ⁴	Масса 1 м ² профиля, кг
ЛАГ-2	125/50	0,8	40	3,24
		1	50	4,06

Трубы стальные электросварные (выборка из ГОСТ 10704—76)

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, мм	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
45	1,4	1,92	1,54	1,51
	1,6	2,18	1,54	1,71
	2	2,7	1,52	2,12
	2,5	3,34	1,5	2,62
	3	3,96	1,49	3,11
48	1,4	2,05	1,65	1,61
	1,6	2,33	1,64	1,83
	2	2,89	1,63	2,27
	2,5	3,57	1,61	2,81
	3	4,24	2,59	3,33
50	1,4	2,14	1,72	1,68
	1,6	2,43	1,71	1,91
	2	3,02	1,7	2,37
	2,5	3,73	1,68	2,93
	3	4,43	1,66	3,48
	3,5	5,11	1,65	4,01
53	1,4	2,27	1,83	1,78
	1,6	2,58	1,82	2,03
	2	3,2	1,81	2,52
	2,5	3,97	1,79	3,11
	3	4,71	1,77	3,7
	3,5	5,44	1,75	4,27
57	1,4	2,45	1,97	1,92
	1,6	2,78	1,96	2,19
	1,8	3,12	1,95	2,45
	2	3,45	1,95	2,71
	2,5	4,28	1,93	3,36
	3	5,09	1,91	4
	3,5	5,89	1,9	4,62
60	1,4	2,57	2,07	2,02
	1,6	2,94	2,06	2,30
	1,8	3,29	2,06	2,58
	2	3,64	2,05	2,36
	3	5,38	2,02	4,22
	3,5	6,22	2,01	4,88
	4	7,03	1,98	5,52
63,5	1,4	2,73	2,2	2,14
	1,6	3,11	2,19	2,44
	1,8	3,49	2,18	2,74
	2	3,36	2,18	3,03
	3	5,71	2,14	4,48
	3,5	6,6	2,12	5,18
	4	7,48	2,11	5,87

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
70	1,4	3,02	2,43	2,37
	1,6	3,44	2,42	2,7
	1,8	3,85	2,41	3,03
	2	4,27	2,41	3,35
	3	6,32	2,37	4,96
	3,5	7,31	2,38	5,74
	4	8,29	2,34	6,51
73	1,4	3,15	2,54	2,47
	1,6	3,59	2,53	2,82
	1,8	4,03	2,52	3,16
	2	4,46	2,51	3,5
	3	6,6	2,48	5,18
	3,5	7,64	2,46	6
	4	8,68	2,44	6,81
76	1,4	3,27	2,64	2,58
	1,6	3,75	2,63	2,94
	1,8	4,2	2,62	3,29
	2	4,65	2,62	3,65
	3,5	7,97	2,57	6,26
	4	9,04	2,55	7,1
	4,5	10,01	2,53	7,93
	5	11,1	2,51	8,76
83	5,5	12,2	2,49	9,56
	1,8	4,59	2,87	3,6
	2	5,1	2,85	4
	2,2	5,57	2,86	4,38
	3,5	8,74	2,82	6,86
	4	9,92	2,8	7,79
	4,5	11,1	2,78	8,71
	5	12,3	2,76	9,62
89	5,5	13,4	2,74	10,51
	2	5,47	3,08	4,29
	2,2	5,99	3,07	4,71
	3,5	9,4	3,03	7,38
	4	10,7	3,01	8,39
	4,5	11,9	2,99	9,38
	5	13,2	2,97	10,36
	5,5	14,4	2,96	11,33
95	2	5,85	3,29	4,59
	2,2	6,39	3,28	5,03
	3,5	10,1	3,24	7,9
	4	11,4	3,22	8,98
	4,5	12,8	3,2	10,04
	5	14,1	3,19	11,1
	5,5	15,5	3,17	12,14

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
102	2	6,28	3,54	4,93
	2,2	6,88	3,53	5,41
	4	12,3	3,47	9,67
	4,5	13,8	3,46	10,82
	5	15,2	3,44	11,96
	5,5	16,7	3,42	13,09
108	2,5	8,28	3,74	6,5
	4	13,1	3,68	10,26
	4,5	14,6	3,66	11,49
	5	16,2	3,65	12,7
	5,5	17,7	3,63	13,9
114	2,5	8,75	3,94	6,87
	4	13,8	3,89	10,86
	4,5	15,5	3,88	12,15
	5	17,1	3,86	13,44
	5,5	18,8	3,84	14,72
121	2,5	9,3	4,2	7,31
	4	14,7	4,14	11,54
	4,5	16,5	4,13	12,93
	5	18,2	4,11	14,3
	5,5	19,9	4,1	15,67
127	2,5	9,77	4,41	7,68
	4	15,5	4,35	12,13
	4,5	17,3	4,34	13,6
	5	19,2	4,32	15,04
	5,5	21	4,3	16,48
133	2,5	10,2	4,62	8,05
	4	16,2	4,57	12,72
	4,5	18,6	4,55	14,62
	5	20,1	4,53	15,78
	5,5	22	4,51	17,29
140	2,5	10,8	4,86	8,48
	4	17,1	4,82	13,42
	4,5	19,2	4,8	15,04
	5	21,2	4,78	16,65
	5,5	23,2	4,76	18,24
152	2,5	11,7	5,29	9,22
	4	18,6	5,24	14,6
	4,5	20,8	5,22	16,37
	5	23,1	5,2	18,13
	5,5	25,3	5,19	19,87

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
159	2,5	12,3	5,54	9,65
	4,5	21,8	5,47	17,15
	5	24,2	5,45	18,99
	5,5	26,5	5,44	20,82
	6	28,8	5,42	22,64
	7	33,4	5,38	26,24
	8	38,3	5,35	29,79
168	3	15,6	5,84	12,21
	5	25,8	5,77	20,1
	5,5	28,1	5,75	22,04
	6	30,5	5,74	23,97
	7	35,4	5,7	27,79
	8	40,2	5,66	31,57
180	5	27,5	6,2	21,58
	5,5	30,1	6,18	23,67
	6	32,8	6,16	25,75
	7	38,1	6,13	29,87
194	5	29,7	6,69	23,3
	5,5	32,6	6,67	25,57
	6	35,4	6,65	27,82
	7	41,1	6,62	32,28
203	5	31,1	7,01	24,42
	5,5	34,1	6,99	26,79
	6	37,1	6,97	29,15
	7	43,1	6,94	33,84
219	5	33,6	7,57	26,39
	6	40,2	7,54	31,52
	7	46,6	7,51	36,6
	8	53	7,47	41,6
	9	59,4	7,43	46,61
245	5	37,7	8,5	29,59
	6	45	8,45	35,37
	7	52,3	8,42	41,09
	8	59,5	8,39	46,76
273	5	42,1	9,48	33,05
	6	50,3	9,45	39,51
	7	58,5	9,42	45,92
	8	66,6	9,38	52,28
299	6	55,2	10,3	43,36
	7	64,2	10,4	50,41
	8	73,1	10,3	57,41
	9	82	10,1	64,37

Трубы стальные бесшовные горячедеформированные
(выборка из ГОСТ 8732—78)

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
57	4	6,66	1,88	5,23
	4,5	7,42	1,86	5,83
	5	8,17	1,85	6,41
	5,5	8,9	1,83	6,99
	6	9,61	1,82	7,55
	7	10,99	1,79	8,63
	8	12,32	1,76	9,67
	9	13,57	1,73	10,65
	10	14,76	1,7	11,59
	11	15,9	1,67	12,48
	12	16,96	1,65	13,32
60	4,5	7,85	1,97	6,16
	5	8,64	1,95	6,78
	5,5	9,41	1,94	7,39
	6	10,18	1,92	7,99
	7	11,65	1,89	9,15
	8	13,07	1,86	10,26
	9	14,42	1,83	11,32
	10	15,71	1,8	12,33
	11	16,93	1,78	13,29
	12	18,1	1,75	14,21
	14	20,23	1,7	15,88
63,5	4,5	8,34	2,09	6,55
	5	9,19	2,08	7,21
	5,5	10,02	2,06	7,87
	6	10,83	2,04	8,51
	7	12,43	2,01	9,75
	8	13,95	1,98	10,95
	9	15,41	1,95	12,1
	10	16,82	1,93	13,19
	11	18,14	1,9	14,24
	12	19,41	1,87	15,24
	14	21,78	1,82	17,09
70	4,5	9,26	2,32	7,27
	5	10,21	2,31	8,02
	5,5	11,14	2,29	8,75
	6	12,06	2,27	9,47
	7	13,85	2,24	10,88
	8	15,58	2,21	12,23
	9	17,25	2,18	13,54
	10	18,85	2,15	14,8
	11	20,39	2,12	16,01
	12	21,87	2,09	17,16
	14	24,63	2,04	19,33
	16	27,14	1,99	21,31
73	4,5	9,68	2,43	7,6
	5	10,68	2,41	8,39

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
73	5,5	11,66	2,39	9,16
	6	12,63	2,38	9,91
	7	14,51	2,35	11,39
	8	16,33	2,31	12,82
	9	18,1	2,29	14,21
	10	19,79	2,26	15,54
	11	21,43	2,23	16,82
	12	23	2,2	18,06
	14	25,95	2,14	20,37
	16	28,65	2,09	22,49
76	17	29,91	2,07	23,48
	18	31,1	2,05	24,42
76	6	13,19	2,49	10,36
	7	15,17	2,46	11,91
	8	17,09	2,42	13,42
	9	18,94	2,39	14,87
	10	20,73	2,36	16,28
	11	22,46	2,33	17,63
	12	24,13	2,31	18,94
	14	27,26	2,25	21,41
	16	30,16	2,2	23,68
	17	31,51	2,17	24,74
83	18	32,79	2,15	25,75
	6	14,51	2,74	11,39
	7	16,71	2,7	13,12
	8	18,85	2,67	14,8
	9	20,92	2,64	16,43
	10	22,93	2,61	18
	11	24,88	2,58	19,53
	12	26,77	2,55	21,01
	14	30,36	2,49	23,82
	16	33,58	2,44	26,44
89	17	36,25	2,41	27,67
	18	36,76	2,39	28,85
	6	15,65	2,94	12,28
	7	18,03	2,91	14,16
	8	20,36	2,88	15,98
	9	22,82	2,85	17,76
	10	24,81	2,82	19,48
	11	26,95	2,79	21,16
	12	29,02	2,76	22,7
	14	38	2,7	25,9
95	16	36,68	2,64	28,81
	18	40,16	2,59	31,52
	20	43,34	2,64	34,03
	6	16,78	3,15	13,17
	7	19,85	3,12	15,19
	8	21,87	3,09	17,16
95	9	24,31	3,06	19,09
	10	26,71	3,03	20,96

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
95	11	29,03	3	22,79
	12	31,29	2,97	24,56
	14	35,63	2,91	27,97
	16	39,71	2,86	31,17
	18	43,54	2,8	34,18
	20	47,12	2,75	36,99
102	6	18,09	3,4	14,21
	7	20,88	3,37	16,4
	8	23,62	3,34	18,55
	9	26,3	3,3	20,64
	10	28,9	3,27	22,69
	11	31,45	3,24	24,89
	12	33,93	3,18	26,63
	14	38,7	3,12	30,38
	16	43,22	3,06	33,93
	18	47,5	3,04	37,29
	20	51,52	2,98	40,45
	22	55,29	2,93	43,4
108	6	19,23	3,61	15,09
	7	22,21	3,58	17,44
	8	25,13	3,55	19,73
	9	28	3,52	21,97
	10	30,79	3,46	24,17
	11	33,52	3,45	26,31
	12	36,19	3,42	28,41
	14	41,34	3,36	32,46
	16	46,24	3,3	36,3
	18	50,87	3,25	39,95
	20	55,29	3,19	43,4
	22	59,44	3,14	46,66
114	6	20,36	3,82	15,98
	7	23,53	3,79	18,47
	8	26,64	3,76	20,91
	9	29,69	3,73	23,31
	10	32,67	3,69	25,65
	11	35,59	3,66	27,94
	12	38,45	3,63	30,19
	14	43,98	3,57	34,53
	16	49,26	3,51	38,67
	17	51,8	3,48	40,67
	18	54,29	3,45	42,62
	20	59,06	3,4	46,36
	22	63,58	3,34	49,92
121	6	21,68	4,07	17,02
	7	25,07	4,04	19,68
	8	28,4	4,01	22,29
	9	31,67	3,97	24,86
	10	34,87	3,94	27,37
	11	38,01	3,91	29,84

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
121	12	41,1	3,88	32,26
	14	47,06	3,82	36,94
	16	53,03	3,76	41,63
	17	55,54	3,73	43,6
	18	58,25	3,7	45,72
	20	63,46	3,64	49,82
	22	68,42	3,59	53,71
	25	75,4	3,51	59,19
127	6	22,81	4,28	17,9
	7	26,39	4,25	20,72
	8	29,91	4,22	23,48
	9	33,36	4,18	26,19
	10	36,76	4,15	28,85
	14	49,7	4,03	39,01
	16	55,79	3,97	43,8
	18	61,64	3,91	48,39
	20	67,23	3,85	52,78
	22	72,57	3,79	56,97
	25	80,11	3,71	62,89
	28	87,09	3,64	68,36
133	6	23,94	4,5	18,79
	7	27,71	4,46	21,75
	8	31,42	4,43	24,66
	9	35,06	4,4	27,52
	10	38,64	4,36	30,33
	11	42,16	4,33	33,1
	12	45,61	4,3	35,81
	14	52,34	4,24	41,09
	16	58,81	4,18	46,17
	18	65,03	4,12	51,05
	20	71	4,06	55,74
	22	76,72	4,01	60,22
	25	84,82	3,91	66,58
	28	92,36	3,64	72,51
140	6	25,26	4,74	19,83
	7	29,25	4,71	22,96
	8	33,18	4,68	26,04
	9	37,04	4,84	29,08
	10	40,84	4,61	32,06
	11	44,58	4,58	35
	12	48,25	4,54	37,88
	14	55,42	4,48	43,5
	16	62,33	4,42	48,93
	18	68,99	4,36	54,16
	20	75,4	4,3	59,19
	22	81,56	4,24	64,02
	25	90,32	4,16	70,9
	28	98,52	4,08	77,34
	30	103,67	4,03	81,38
146	5	22,15	4,99	17,39
	6	26,39	4,95	20,72

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
146	7	30,57	4,92	24
	8	34,68	4,89	27,23
	9	38,73	4,85	30,41
	10	42,73	4,82	33,54
	11	46,55	4,79	36,62
	12	50,52	4,76	39,66
	14	58,06	4,69	45,57
	16	65,35	4,63	51,3
	18	72,38	4,57	56,82
	20	79,17	4,51	62,15
	22	85,7	4,45	67,28
	25	95,03	4,37	74,6
	28	103,8	4,29	81,48
	30	109,33	4,24	85,82
152	6	27,52	5,17	21,6
	7	31,89	5,13	25,03
	8	36,19	5,1	28,41
	9	40,43	5,07	31,74
	10	44,61	5,03	35,02
	11	48,73	5	38,25
	12	62,78	4,97	41,43
	14	60,7	4,9	47,55
	16	68,36	4,84	53,66
	18	75,78	4,78	59,48
	20	82,94	4,72	65,11
	22	91,12	4,66	71,53
	25	99,75	4,58	78,3
	28	109,07	4,49	85,63
	30	115	4,44	90,26
159	9	42,41	5,31	33,29
	10	48,8	5,28	36,75
	11	51,15	5,25	40,15
	12	66,42	5,21	43,5
	14	63,77	5,15	50,06
	16	77,66	5,09	56,43
	18	79,73	5,03	62,59
	20	87,33	4,97	68,56
	22	94,69	4,91	74,33
	25	105,24	4,82	82,62
	28	115,23	4,74	90,46
	30	121,58	4,68	95,44
168	9	44,96	5,63	35,29
	10	49,64	5,6	38,97
	11	54,26	5,56	42,59
	12	58,81	5,63	46,17
	14	67,73	5,47	58,17
	16	76,4	5,4	59,98
	18	84,82	5,84	66,59
	20	92,99	5,28	73
	22	100,91	5,22	79,21
	25	112,31	5,13	88,16
	28	123,15	5,05	98,67
	30	130,06	4,99	102,1

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
180	7	38,05	6,12	29,87
	8	43,22	6,09	33,93
	9	48,35	6,05	37,95
	10	53,41	6,02	41,93
	11	58,4	5,99	46,85
	12	63,33	5,95	49,72
	14	73,01	5,89	57,31
	16	82,44	5,83	64,71
	18	91,61	5,76	71,91
	20	100,53	5,7	78,92
	22	109,2	5,64	85,72
	25	121,74	5,55	95,66
194	28	133,71	5,46	104,95
	30	141,37	5,4	110,98
194	8	46,75	6,58	36,7
	9	52,31	6,55	41,06
	10	57,81	6,52	45,38
	11	63,24	6,48	49,64
	12	68,61	6,45	53,86
	14	79,17	6,38	62,15
	16	89,47	6,32	70,24
	18	99,53	6,26	78,13
	20	109,33	6,19	85,82
	22	118,89	6,13	98,32
	25	132,73	6,04	104,2
	28	146,02	5,95	114,63
203	30	154,57	5,9	121,34
	8	49,01	6,9	38,47
	9	54,85	6,87	43,06
	10	60,63	6,83	47,61
	11	66,35	6,8	52,09
	12	72,01	6,77	56,52
	14	83,13	6,7	66,25
	16	94	6,54	73,79
	18	104,62	6,57	82,12
	20	114,98	6,51	90,26
	22	125,1	6,45	98,2
	25	139,8	6,36	109,74
203	28	153,94	6,27	120,84
	30	163,06	6,21	127,99

Приложение 11

Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные
по ТУ 14-2-361-79

Наружный размер сторон, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
63	3	6,81	2,41	5,35
	4	8,75	2,35	6,87
	5	10,5	2,29	8,26

Наружный размер сторон, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
70	3	7,55	2,7	6,01
	4	9,87	2,64	7,75
	5	11,9	2,58	9,36
80	3	8,85	3,1	6,95
	4	11,5	3,05	9,01
	5	13,9	2,99	10,9
	6	16,2	2,93	12,7
90	3	10,1	3,51	7,89
	4	13,1	3,46	10,3
	5	15,9	3,4	12,5
	6	18,6	3,34	14,6
100	3	11,3	3,92	8,83
	4	14,7	3,87	11,5
	5	17,9	3,81	14,1
	6	21	4,75	16,5
	7	23,9	3,69	18,8
110	3	12,5	4,33	9,78
	4	16,3	4,28	12,8
	5	19,9	4,22	15,6
	6	23,4	4,16	18,4
	7	28,7	4,1	21
125	3	14,3	4,94	11,2
	4	18,7	4,89	14,7
	5	22,9	4,83	18
	6	27	4,78	21,2
	7	30,9	4,72	24,3
	8	34,7	4,66	27,2
140	3	16,1	5,56	12,6
	4	21,1	5,5	16,5
	5	25,9	5,45	20,4
	6	30,6	5,39	24
	7	35,1	5,33	27,6
	8	39,6	5,27	31
160	3	18,5	6,37	14,5
	4	24,3	6,32	19,1
	5	29,9	6,26	23,5
	6	35,4	6,21	27,8
	7	40,7	6,15	32
	8	45,9	6,09	36
180	4	27,5	7,14	21,6
	5	33,9	7,08	26,6
	6	40,2	7,03	31,6
	7	46,3	6,97	36,4
	8	52,3	6,91	41,1

Наружный размер сторон, мм	Толщина стенки, мм	Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м, кг
200	4	30,7	7,95	24,1
	5	37,9	7,9	29,8
	6	45	7,84	35,3
	7	51,9	7,79	43,8
	8	58,7	7,73	46,1

Примечание. Радиус закругления в углах сечения — не более двух толщин стенки.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Сортамент стержневой горячекатаной арматурной стали периодического профиля по ГОСТ 5781—75 для **висячих покрытий**

Номинальный диаметр, мм	Площадь поперечного сечения, см ²	Масса 100 м, кг	Номинальный диаметр, мм	Площадь поперечного сечения, см ²	Масса 100 м, кг
16	2,011	157,8	28	6,158	483,4
18	2,545	199,8	32	8,042	631,3
20	3,142	246,6	36	10,18	799
22	3,801	298,4	40	12,56	987
25	4,909	385,3			

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

Канаты стальные для **висячих покрытий**

Диаметр каната, мм	Расчетная площадь сечения всех проволок, мм ²	Расчетная масса 1000 м каната, кг	Диаметр каната, мм	Расчетная площадь сечения всех проволок, мм ²	Расчетная масса 1000 м каната, кг
--------------------	--	-----------------------------------	--------------------	--	-----------------------------------

Канат одинарной свивки типа ТК конструкции
1×37 (1+6+12+18) по ГОСТ 3064—80

12/1,7*	84,26	719	20/2,8*	228,74	1955
12,5/1,8	94,44	806	21/3	262,51	2240
14/2	116,89	993,6	22,5/3,2	298,52	2550
15,5/2,2	141,37	1200	24/3,4	337,03	2875
17/2,4	168,17	1425	27/3,8	420,84	3690
18,5/2,6	197,29	1685			

Канат двойной свивки типа ЛК-РО конструкции
6×36 (1+7+7/7+14)+7×7 (1+6) по ГОСТ 7669—80

28	373,25	3495	45,5	991,84	9045
30	422,76	3890	49	1163,04	10600
32,5	487,48	4445	52	1304,05	11850
35,5	580,11	5290	57	1520,73	13900
36,5	646,37	5895	61,5	1782,25	16250
39	716,29	6530	64	1880,27	17148
41	796,83	7265	68	2058,71	18775
42	843,90	7965	72	2316,38	21125

* Под чертой — диаметр проволоки в мм.

Диаметр каната, мм	Расчетная площадь сечения всех проволок, мм ²	Расчетная масса 1000 м каната, кг	Диаметр каната, мм	Расчетная площадь сечения всех проволок, мм ²	Расчетная масса 1000 м каната, кг
--------------------	--	-----------------------------------	--------------------	--	-----------------------------------

**Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции
6×19 (1+6+6/6)+7×7 (1+6) по ГОСТ 14954—80**

8	29,68	272,5	23	247,17	2265
8,8	35,7	327,5	25	279,27	2560
9,7	42,3	388	27	337,27	3090
11	53,58	491,5	29,5	404,55	3705
12	61,92	568	31	449,85	4125
12,5	70,91	650,5	33	497,7	4565
14	86,36	792	36	589,81	5410
15	100,48	921,5	38,5	674,88	6190
16,5	121,24	1115	41	768,45	7050
18	143,99	1320	46,5	988,71	9065
19	165,68	1520	49,5	1117,11	10250
20,5	192,11	1765	55	1379,27	12650
22	217,06	1990			

Канат закрытый несущий по ГОСТ 7876—73

50	1713,8	14695,1	60	2408,69	20636,0
52	1846,16	15828,3	65	2763,97	23673,1
54	1988,1	17043,7	70	3231,84	27671,2
55	2016,33	17280,6			

Примечания: 1. Канаты типа ТК с точечным касанием проволок. 2. Канаты типа ЛК с линейным касанием проволок. 3. Индексы О, Р означают соответственно, что проволоки в слоях каната одинакового или разного диаметра. 4. Цифровое обозначение, например 1×37 (1+6+12+18), раскрывает количество проволок в канате и формулу размещения проволок.

1. Анищенко А. М. Архитектура сооружений с висячими покрытиями. Киев, 1970.
2. Арсеньев Л. Б. Легкие металлические конструкции за рубежом. — Монтажные и специальные работы в строительстве, 1974, № 10.
3. Беленя Е. Н. Предварительно-напряженные несущие металлические конструкции. 2-е изд. М., 1975.
4. Богданова Е. Н. Висячие конструкции покрытий. Зарубежный опыт. — Обзор/ВНИИИС. М., 1980.
5. Брудка Я. Трубчатые стальные конструкции. Пер. с польск. М., 1975.
6. Бюттнер О., Хампе Э. Сооружение — несущая конструкция — несущая структура. Пер. с нем. М., 1981.
7. Васильев А. А. Металлические конструкции. 3-е изд. М., 1979.
8. Волчок Ю. П. Экспериментальные поиски пространственных конструктивно-тектонических систем (из довоенного опыта отечественной архитектуры). — В кн.: Архитектурное творчество СССР. М., 1979, вып. 5.
9. Горенштейн Б. В. Железобетонные пространственные конструкции для строительства на Севере. Л., 1979.
10. Гохарь-Хармандарин И. Г. Большепролетные купольные здания. М., 1972.
11. Губенко А. Б., Клятис Г. Я. Металлические ограждающие конструкции с напыленным пенопластом. Отечественный и зарубежный опыт. — Обзор/ВНИИИС. М., 1980.
12. Дмитриев Л. Г., Касилов А. В. Вантовые покрытия (расчет и конструирование). 2-е изд. Киев, 1974.
13. Дыховичный Ю. А. Большепролетные конструкции сооружений Олимпиады-80 в Москве. М., 1982.
14. Ежов В. И., Анищенко А. М., Пересичный В. А. Общественные здания с применением легких металлических конструкций. — Обзор/ЦИТИ по гражданскому строительству и архитектуре. М., 1976.
15. Железобетонные конструкции. Специальный курс/В. Н. Байков, П. Ф. Дроздов, И. А. Трифонов и др. — 3-е изд. М., 1981.
16. Зигель К. Структура и форма в современной архитектуре. Пер. с нем. М., 1965.
17. Качурии В. К. Статический расчет вантовых систем. Л., 1969.
18. Кирсанов Н. М. Альбом конструкций висячих покрытий. Конструктивные и компоновочные решения. М., 1965.
19. Кирсанов Н. М. Висячие конструкции. М., 1968.
20. Кирсанов Н. М. Висячие и вантовые конструкции. М., 1981.
21. Кольчук В. Элементы мобильной формы в советской архитектуре. — В кн.: Архитектурное творчество СССР. М., 1979, вып. 5.
22. Конструкции гражданских зданий/М. С. Туполев, А. Н. Попов, А. А. Попов и др. — 2-е изд. М., 1973.
23. Конструкции и форма в советской архитектуре/Ю. П. Волчок, Е. К. Иванова, Р. А. Кацнельсон, Ю. С. Лебедев. М., 1980.
24. Конструкции промышленных зданий/А. Н. Попов, М. С. Туполев, В. В. Буртман и др. М., 1972.
25. Косенко И. С. Висячие конструкции покрытий. Зарубежный опыт. М., 1966.
26. Кузнецов В. В., Нестеров В. В. Современное состояние и тенденции развития строительства из легких металлических конструкций. — Обзор/ЦИНИС. М., 1974.
27. Легкие металлические конструкции одноэтажных производственных зданий. Справочник проектировщика/И. И. Ищенко, Е. Г. Кутухтин, В. М. Спиридонов, Ю. Н. Хромец. М., 1979.
28. ЛенЗНИИЭП. Методические указания по проектированию, моделированию и расчету некоторых типов висячих покрытий общественных зданий. Л., 1974.
29. Лубо Л. Н., Миронков Б. А. Плиты регулярной пространственной структуры. Л., 1976.
30. Лютковский И. Г. Комбинированные висячие покрытия. — Труды/НИИЖБ. М., 1973, вып. 8. Висячие покрытия.
31. Мельников Н. П. Металлические конструкции за рубежом. М., 1971.

32. **Металлические конструкции**/Е. И. Беленя, А. Н. Геинев, В. А. Балдин и др. — 5-е изд. М., 1976.
33. **Металлические конструкции. Специальный курс**/Н. С. Стрелецкий, Е. И. Беленя, Г. С. Ведеников и др. — 2-е изд. М., 1982.
34. **Металлические конструкции. Справочник проектировщика.** — 2-е изд. М., 1980.
35. **Морозов А. П., Василенко О. В., Миронков Б. А. Пространственные конструкции общественных зданий.** — 2-е изд. Л., 1977.
36. **Москалев Н. С. Конструкции висячих покрытий.** М., 1980.
37. **Муханов К. К. Металлические конструкции.** — 3-е изд. М., 1978.
38. **Общественные здания и пространственные конструкции**/А. П. Морозов, О. В. Василенко, С. М. Верижников, Б. А. Миронков. Л., 1972.
39. **Отто Ф., Шлейер Ф.-К. Тентовые и вантовые строительные конструкции.** Пер с нем. М., 1970.
40. **Песчанский П. С., Пугачевская Л. М. Металлические решетчатые пространственные конструкции за рубежом.** — Обзор/ЦИНИС. М., 1974.
41. **Пространственные покрытия (конструкции и методы возведения)**/Г. Рюле, Г. Аккерман, У. Бекман и др. Пер. с нем. М., 1974. Т. 2. Металл, пластмассы, керамика, дерево.
42. **Райт Д. Т. Большепролетные сетчатые оболочки.** — В кн.: Большепролетные оболочки. М., 1969. Т. 1.
43. **Руководство по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий**/НИИЖБ, Госстрой СССР. М., 1979.
44. **Руководство по применению стальных канатов и анкерных устройств в конструкциях зданий и сооружений**/НИИСК Госстроя СССР. М., 1978.
45. **Санчес-Аркас М. Оболочки (Железобетонные оболочки и складки, их формы. Висячие системы покрытий).** Пер. с нем. М., 1964.
46. **Соботка Зденек. Висячие покрытия.** Пер. с чешского. М., 1964.
47. **Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический.** — 2-е изд. М., 1972. Кн. 1; 1973. Кн. 2.
48. **СССР. Министерство монтажных и специальных строительных работ. Каталог летных несущих и ограждающих металлических конструкций и комплектующих изделий для промышленных зданий.** М., 1979.
49. **Стальные конструкции. Справочник конструктора.** — 3-е изд. М., 1976.
50. **Строительные нормы и правила СНиП II-6-74. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования.** М., 1976.
51. **Строительные нормы и правила СНиП II-23-81. Стальные конструкции. Нормы проектирования.** М., 1982.
52. **Строительные нормы и правила СНиП II-24-74. Аллюминиевые конструкции. Нормы проектирования.** М., 1975.
53. **Таиров В. Д. Сетчатые пространственные конструкции.** Киев, 1966.
54. **Трофимов В. И. Большепролетные пространственные покрытия из тонколистового алюминия.** М., 1975.
55. **Трофимов В. И., Бегун Г. Б. Структурные конструкции (исследование, расчет и проектирование).** М., 1972.
56. **Трущев А. Г. О возможности аппроксимации простейшими расчетными схемами напряженного состояния пологих оболочек положительной и отрицательной гауссовой кривизны.** — Известия вузов. Сер.: Строительство и архитектура, 1980, № 10.
57. **Трущев А. Г. Проектирование большепролетных металлических конструкций (Вантовые системы покрытий).** М., 1977.
58. **Файбишенко В. К. Металлические конструкции.** М., 1980.
59. **Файбишенко В. К., Попов А. А. Применение перекрестно-стержневых покрытий в промышленном и гражданском строительстве.** М., 1973.
60. **Хайдуков Г. К., Смирнова Е. М. Пространственные большепролетные конструкции покрытий.** — Зарубежный опыт/ВНИИИС, М., 1980.
61. **Юрген Едике. История современной архитектуры. Синтез формы, функций и конструкций.** Пер. с нем. М., 1972.
62. **Яриленко А. Д. Структурные покрытия в архитектуре общественных зданий.** — Обзор/ЦНТИ по гражд. строительству и архитектуре. М., 1974.
63. **Büttner O., Stenker H. Metalleichtbauten. Band 1, Ebene Raumstabwerke.** Berlin, 1971.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автобусный гараж в Берлине (ГДР) 23
 — в Киеве 16
 Акриловое стекло 29, 126, 157
 Алюминиевые конструкции 7, 28, 69, 71, 125, 153, 177, 184
 Амортизатор 157
 Анкер типа «колодка с пробкой» 79
 Акриловая коническая оболочка 74
 Анкерное крепление 75
 Аппроксимация 168
 Арки боковые 45
 — взаимно пересекающиеся 6, 39, 43
 — внутренние 47, 66
 — встраиваемые 143
 — двухшарнирные 160
 — контурные 140, 148, 187
 — коробчатого сечения 43, 45, 67
 — наклонные 5, 42, 56, 67
 — наружные 47
 — опрокинутые 42, 44
 — промежуточные 10, 53, 57
 — разомкнутые 42
 — трехшарнирные 147
 Архитектурная выразительность 6, 12, 14
 37, 46, 105, 111, 125, 137, 142, 148, 156
 Балка висячая 7, 56
 Бетон монолитный 7, 9, 18, 62
 — на натянутом цементе 9, 16, 62
 Бетонная рубашка 61
 Блок монтажный 123, 153
 пристроенный типа «Берлин» 124
 «ЦИНИСКО» 117, 124
 Болт высокопрочный 71, 79, 119, 154, 171, 190
 — крепежный 157
 — монтажный 150, 155
 — самонарезающий 124
 — стяжной 51, 79, 119, 151, 158
 Бортовой элемент висячего покрытия 10, 22, 73
 — гнупа 70, 153, 188
 — металлический 21, 29, 36, 188
 Бухта 4
 Ванта вогнутая 21
 — выпуклая 21
 — главная 48, 94
 — диагональная 56
 — дополнительная 14
 — жесткая 56
 — несущая 7, 12, 21, 25, 37, 51, 60, 93
 — открытая 27, 31, 60, 116
 — поперечная 5, 58
 — продольная 5, 60
 — промежуточная 10
 — стабилизирующая 16, 21, 25, 51, 63, 67, 93
 Вантовая сеть косоугольная 38, 40
 — ортогональная 5, 37, 40, 49
 — с шестиугольным планом 48
 Вантовая схема работы покрытия 7, 9, 12, 16, 24
 Варьирование форм покрытия 12, 45, 47, 137, 140
 Велотрек в Крылатском (Москва) 67
 Веревоный многоугольник 14
 Вертикальная составляющая опорной реакции 19, 49, 82, 88
 Вертикальные перекрестные фермы 23, 108
 Верхний пояс висячих ферм и балок 56
 — контурной фермы 169
 — перекрестно-стержневой плиты 108, 121, 125
 — покрытия типа «велосипедное колесо» 27
 Ветровой отсос 9, 62, 64, 72, 81, 159
 Винтовая стяжка 35
 Висячая оболочка с прямоугольным и квадратным планом 7, 9
 Вогнутость оболочки 13, 27, 170, 172
 Водянистый лист 31, 156, 193
 Временное сопротивление разрыву 8, 94, 174, 190
 Выпуклость оболочки 170, 172
 Выпуск арматуры из плит 18
 Высота поперечного сечения висячей фермы или балки 56
 — контурной арки 73, 102
 — контурного ребра пологой оболочки 148, 187
 — перекрестно-стержневой плиты 112, 174, 177
 Генеральные размеры 93, 112
 Генгаздр 108, 114, 184
 Герметик лепточный 156, 158
 Геометрическая неизменяемость 111, 112, 142, 146, 151
 Гибкость распорки между вантами 95, 102
 стержня 115, 173, 191
 Гидроизоляционный ковер 9, 29, 32, 57, 60, 62, 97, 124, 156
 Гильзоустановочный анкер 77
 Гильзоустановочный анкер 79
 Гипар многопестковый 140
 — однопестковый 37, 170, 172
 — пятипестковый 140
 — четырехпестковый 140, 153, 171, 173, 187
 Главная ось покрытия 91, 167, 177
 Грань диафрагмы 169
 — складки 163, 182
 Грузовая площадь 82, 85, 88, 91, 135, 163
 Две взаимно пересекающиеся арки 6, 39, 42, 102
 Дворец спорта в г. Фрунзе 68
 Двутавр 10, 38, 49, 115, 120, 124
 Деталь фасонная 119, 150, 152
 Деформативность покрытия 4, 9, 54, 61, 81, 142
 Деформация неравномерная 157
 Диагональное расположение поперечной 112
 Диаграмма Максвелла Кремонны 164, 183
 Диаметр центрального барабана 5, 29
 Диафрагма листовая 79, 118, 151
 — пологой оболочки 139, 148, 169, 185
 — промежуточная 148
 — складки 138
 — торцовая 137, 147, 150
 — цилиндрической оболочки 138
 Динамометрический гачный ключ 53
 Длина дуги свода 158, 162, 179
 Допускаемое перенапряжение конструкции 98, 185
 Допущения в расчете приближенном 132, 169
 — вантовой сети 62
 — пологой оболочки 167
 Единичная полоска плиты 129, 132, 176, 179
 свода 159, 161, 180
 Жесткая шить 65
 Жесткость канатов 8
 — опорного контура пологой оболочки 167
 покрытия 4, 7, 9, 18, 27, 61, 65, 87, 92, 107, 146
 узлов оболочки 146
 Заливка швов бетоном 17, 97
 Заливной анкер 77
 Замоноличивание швов между плитами 9, 16, 34, 63
 Замысел архитектора 37, 81, 105, 113, 148
 Запрессованный конец каната 77
 Затяжка диагональная 141, 173
 — между фундаментами 66, 69
 — по контуру покрытия 171, 173
 — по ряду колонн 138
 Защита вант от коррозии 21, 27, 31

- в условиях в куполе 164, 184
- в оболочке 167, 186
- в критической мембране 95, 104
- в провисании мембраны 65, 66
- метод пробных попыток 92, 176
- механическое натяжение ванты 33, 52
- модуль упругости алюминия 185
- бетона 95, 100, 104
- каната 8, 147
- материала 62, 166
- металла 162, 170
- стали 177, 181, 187
- Момент инерции поперечного сечения 95, 100, 160, 162, 177, 181, 192
- Момент сопротивления 177, 181, 192
- Муфта в распорке вантовой фермы 35
- в растяжке 33, 35
- с резьбой для конца каната 77
- Нагрузка ветровая на висячую оболочку 9
 - на купол 165, 184
 - на свод 159, 180
 - критическая 170, 187
 - линейная 82, 88, 91, 98, 101, 103
 - неравномерная 7, 13, 60
 - несимметричная 24, 61
 - нормальная к поверхности оболочки 164, 167
 - нормативная 97, 101, 104, 158, 175, 177
 - от собственной массы конструкции 83, 158, 163, 165, 169, 175, 179, 182, 184
 - постоянная 158, 164, 180, 184
 - равномерно распределенная 81, 83, 96, 127, 135, 159, 163, 165, 167, 187
 - расчетная 83, 87, 93, 96, 101, 159, 165, 172, 175, 178, 186
 - снеговая 83, 97, 101, 160, 165, 175, 178, 182, 186
 - сосредоточенная 7, 91, 94, 162, 182
 - треугольная 95, 91, 159, 180
 - узловая 164, 183
- Накладка штампованная 33, 51
- Наклонное положение купола 141
- Напыленный пенопласт 30, 125
- Нарушение кровельного ограждения 9, 54, 156
- Настил профилированный 17, 30, 32, 54, 56, 124, 177, 191
- Натяжение вант домкратом 9, 16, 21, 25, 40, 43, 52, 80
 - одновременное всей вантовой сети 50, 53
- Натяжное приспособление 36, 82, 70, 80
- Нашельники 30, 32, 157
- Недостатки вантовой сети с шестигольными ячейками 49
- врезного узла сетчатой оболочки 151
- гилара 141
- заливного анкера 78
- конической мембраны 61
- перекрестных вантовых ферм 24
- покрытия висячего 4
- подвесного 60
- пространственного решетчатого 105, 112
- с висячими фермами и балками 56
- типа «велосипедное колесо» 25, 27
- струнного 54
- трансформируемого складчатого свода 142
- Неравномерность распределения усилия по длине ванты 82, 84
- Нижний пояс стержневой плиты 108, 120, 123, 126
- Область применения конструкций 4, 54, 61, 105, 107, 136
- Оболочка висячая 7, 12, 27, 39, 51, 96
 - двухлопастная 136, 146, 151, 155
 - коническая 27, 61, 74, 141
 - мембранная 65
 - многолопастная 139
 - монолитная 7, 9, 17, 18
 - однолопастная 141
 - однолопастная 136, 146, 148
 - пологая 139, 140, 146, 185
 - седлообразная 5, 38, 40, 50, 69
 - сетчатая 107, 136, 142, 146, 149, 153, 171, 185
 - сплошная 136, 164
 - цилиндрическая 138, 142
 - чашеобразная 14, 66, 71, 104
 - шатровая 54
- Образующая гиперболического параболоида 40, 70, 140, 142, 170, 172, 187
- Обрешетка 156, 158, 180
- Одинарный сжим 35, 75
- Олимпийский плавательный бассейн в Москве 57
 - в Мюнхене (ФРГ) 50
 - в Токио (Япония) 47
 - стадион в Москве 66
 - в Ско-Вэлли 59
- Омоноличивание металлического бортового элемента 36
- Опалубка подвесная 9, 17
- Опирание вконтруктурное 15, 114, 116, 127
- изогнутого опорного кольца 5, 38
- настила на ванты 18, 32
- по контуру 13, 24, 26, 38, 62, 66, 71, 114, 127, 134, 157, 175, 178
- Опора анкерная 11
 - комбинированная 115
 - промежуточная 133
 - пространственная 114
 - стержневой плиты 114, 116
 - угловая 15, 28, 69, 114
 - упругая 10, 50, 115
 - центральная 16, 26, 28, 49
- Опорная конструкция 4, 21, 22, 25, 73
- реакция 19, 81, 132, 161
- Опорное кольцо второе 26
 - изогнутое 5, 38, 58
 - купола 139
 - нижнее 27
 - плоское 24, 39, 50, 64, 73, 95
 - промежуточное 14, 66, 99
- Опорный контур безыгибный 28, 39, 55
 - гибкий 43, 50
 - замкнутый 38, 73
 - прямолинейный 37, 48, 54, 73
 - разомкнутый 11, 73, 74
- Оптимальная кривизна нитей в вантовой сети 51
- Органическое стекло (см. Акриловое)
- Ордината линии ванты 81
- сечения свода 161
- Освещение естественное 13, 29, 45, 48, 106, 125, 137, 156
- Ось координат 134
- Отверстие в опорном контуре 20
- Отвод воды с покрытия 4, 11, 17, 27, 41, 50, 54, 62, 72, 97
- Оттяжка вертикальная 40, 42, 70, 74, 83, 88
- наклонная 22, 48, 50, 59, 73, 83, 88
- наружная 43
- продольная 22
- Очертание арки опорного контура 39, 45, 47
- Павильон в Нижнем Новгороде (1896 г.) 6, 61
- совета Европы на выставке в Брюсселе 58
- СССР на выставке в Брюсселе 59
- «Охота и охотничье хозяйство» на ВДНХ 69
- Панель двухслойная для легкой кровли 30, 32
 - из гнутых стальных профилей 30
 - стеклопластиковая 32, 157
 - трехслойная алюминиевая 30, 32, 156, 158
 - утепленная 18
- Параболонд гиперболический 37, 56, 66, 68, 70, 141, 148, 170
- эллиптический 39
- Пароизоляция 31, 68, 97, 99, 124
- Пентаэдр 108, 112, 119, 174

- Первичная — длина ванты 83, 84, 89, 90, 98
- Перепад опор ванты по высоте 11, 12, 22, 48, 82
- Пересечение стабилизирующих и несущих вант 22, 25, 26, 33, 51
- Петля простая 78
 - с влетенным коушем 77
 - с коушем 20, 77
- Пилоны 10, 14, 43, 48, 50, 74, 141, 171
- Пирамида стержневая 108, 109, 119
- Плавательный бассейн в Метцингене (ФРГ) 110
- Пленка полиэтиленовая 68
- Плота круглая 133, 178
 - оболочки 140, 167
 - плоская 18, 75
 - прямоугольная 127, 129
 - раздвигающегося типа 124
 - сборная височей оболочки 17
 - секторная 132
 - с квадратными поясными ячейками 112, 174
 - с опиранием по контуру 127
 - по углам 130
 - сплошная 127, 134
 - стержневая 108, 111, 116, 174, 177
 - с треугольными поясными ячейками 112, 178
 - с шестиугольными поясными ячейками 109, 112
 - тонкая 126
 - треугольная 114, 116, 131
 - эллиптическая 133
- Поверхность вращения 144
 - гипара 53, 56, 96, 140, 170
 - криволинейная 146
 - купола 142, 144
 - пологой оболочки 146
 - оболочки 136, 172
 - свода 136, 142
 - седловидная 40, 65
 - сферы 61, 139, 145
 - цилиндрическая 64, 141
- Подающие предварительного напряжения стабилизирующей ванты 87, 90, 94
- Погрешность упрощенного расчета 83, 127
- Подбор сечения ванты 24, 98, 102
 - внецентренно-сжатого стержня 174, 181
 - криволинейного бруса 187
 - профилированного настила 177
 - распорки в вантовом покрытии 95, 102
 - растянутого болта 95, 174, 177
 - растянутого стержня 173, 176
 - сжатого стержня 174, 176, 179
 - центрального кольца 95, 100
- Подвеска алюминевая 28
 - вантовая 60
 - вертикальная 22, 27, 59
- Подвесная конструкция 7, 59
- Подкрепляющая сеть 65
- Подмости 4, 63, 70
- Подсчет нагрузок на 1 м² покрытия 83, 97, 101, 104, 158, 175, 178
- Покрытие болшерпролетное 153, 156
 - вантовое 7, 38, 49, 50, 55, 80
 - в виде усеченной пирамиды 111
 - висящее 4, 80
 - вогнутое 5, 9, 13, 46, 24, 27, 84, 89, 90
 - выпуклое 89
 - двупоясное 7, 21, 35, 87, 89, 100, 136, 161
 - двухпролетное 127
 - двухскатное 109
 - купольное 139
 - мембранно балочное 64
 - мембранное 60, 70, 80, 104
 - многопролетное 10, 14, 24, 86
 - однопоясное 136
 - односкатное 109
 - однослойное 12, 85, 136
 - плоское 107, 111, 125
 - подвесное 59
 - с вантовой сетью 37, 61, 73, 92, 102
 - с висящими фермами и балками 8, 56
 - сводчатое 148
 - с вынесенным опорным контуром 15
 - седловидное 4, 40
 - складчатое 25, 28, 138, 142
 - сложной формы 111
 - с одной опорной аркой 48
 - с параллельными вантами 9, 21, 81, 67
 - спиральное 13, 86
 - с прозрачной кровлей 156
 - с радиальными вантами 12, 25, 73, 84, 89
 - без центрального кольца 13, 14
 - стропильное 147
 - струнное 51
 - типа «велосипедное колесо» 26, 90
 - трехпролетное 127
 - холодное 29
 - четырехпролетное 127
 - шатровое 13, 27, 81, 86, 98
 - шедовое 105
- Попытки разрывного усилия каната 75
- Поперечное ребро в мембранном покрытии 64, 68
- Поперечное сечение бортового элемента арочного 41, 67, 79, 102
 - кольцевого 15, 16, 38, 63, 66, 73, 98, 104
 - прямолинейного 11, 73, 97
 - опорного кольца 19, 21, 95, 96, 104
 - центрального кольца 19, 93, 100
- Потолок подвесной 126
- Поясная сетка ортогональная 112
- Предварительная вытяжка клинги 8
- Предварительное напряжение вантовой сети 37, 49, 51, 53
 - оболочки 17
 - отышек 60
 - покрытия 9, 20, 22, 27, 83, 75, 90
 - продольных ребер мембраны 64
- Предельная гибкость распорок в вантовом покрытии 95, 102
- Предельное состояние второй группы 81
 - первой группы 81
- Преимущества вантовой сети с шестиугольными ячейками 49
 - висящих покрытий 4
 - ферм и балок 50
 - мембранных покрытий 60
- перекрестно стержневых конструкций 107
- пространственных решетчатых конструкций 105
- Приближенный расчет 81, 95, 126, 162, 164, 167, 170
- Пригрузка покрытия 5, 9, 20, 62
- Призма стержневая 109, 112
- Притягивание концов стабилизирующих вант 25, 51, 53
 - стабилизирующих лент 70
 - углов гипаров 70
- Проволока высокопрочная для вант 5, 80, 95
- Прогиб ванты 81, 83, 98
 - настила 177
- Прогон 24, 31, 49, 66, 124, 152, 157, 184
 - решетчатый 60
- Продольное ребро мембранного покрытия 64, 65, 68
- Проем в перекрестно стержневой плите 110
- Пролет однопоясной сетчатой оболочки 146
- Промежуточное стальное кольцо депоной мембраны 72
- Пространственная работа покрытия 112, 113, 142
- Пространственное подвешение покрытие 39
- Профиль поперечного сечения покрытия 111
 - складки 138
- Процеливание узла 146, 181, 187
- Пучок высокопрочной проволоки 40, 79
- Пята арки 42
- Равновесие покрытия с двумя пересекающимися арками 39

- сечения бортового элемента 16, 19, 93
- стержня 134, 162, 166
- Удлинение ванты 82, 98, 102
- Узел врасной 150
- Узловое соединение «Абстракта» 150
- болтовое 119, 150
- «Вупперман» 150
- звездчатое 150
- «ИФИ» 117, 123, 124, 146, 148
- «МАРХИ» 117, 124, 175
- «Меро» 117
- «Октадлатте» 120, 146
- сварное 119, 150
- стержневой оболочки 146, 148
- с фасонной деталью 119
- тарельчатое 150
- «Триодетик» 117, 146, 148
- «ЦИНИСКИ» 120, 146
- «Эс-дю-Шаго» 148
- «Юнистрат» 116
- Уклон бортовых элементов 11, 24
- покрытия 13, 138, 139
- Унифицированная длина стержней 112
- Упрощенный расчет распора ванты 81, 84
- Уравнение для оболочки вращения 164, 168
- Усилие в ванте 9, 19, 80, 81, 98
- в вертикальной оттяжке 83, 69
- в двухслойной мембране 96
- в мембране из переплетных лент 96
- в наружном кольце 84, 85, 90, 104
- в наклонной оттяжке 19, 83, 89
- в несущей ванте 87, 90, 101, 103
- в опорной зоне стержневой плиты 115, 132
- в опорной стойке 19
- в опорном раскосе 133, 176
- в поясах стержневой плиты 133, 176
- в промежуточном опорном кольце 86
- в раскосе между вантами 89
- в раскосе решетчатой капители 135
- в распорке между вантами 89, 90
- в растяжке волнутого вантового покрытия 89
- в стабилизирующей ванте 88, 101, 103
- в стержне гилара 172, 188
- в стержне купола 166, 185
- в стержне пологой оболочки 169
- в стержне свода 161, 162, 181
- в сферической мембране 61, 95
- в тросе-подборе 94
- в центральном кольце 84, 85, 86, 90, 100
- в цилиндрической мембране 96
- в латеральной мембране 96
- линейное 165
- максимальное 81, 85, 87, 92, 99, 169, 176, 179
- остаточное 21, 89
- сдвигающее 167, 172
- Устойчивость вантовых ферм 23, 29
- купола 166, 185
- оболочки 9
- опорного кольца 29, 95, 100, 104
- опоры 22
- покрытия 24, 111
- пологой оболочки 170, 187
- свода 162, 181
- сетчатой оболочки 136, 146
- Утепление кровли 29, 54, 153
- Фасонка в концевом креплении ванты 79
- в узловом соединении 155
- пространственная 118
- Фермы 67
- штампованная 118
- Ферма вантовая 21, 24, 28, 34, 64, 87, 89
- вантово-стержневая 21
- всякая 56, 65
- выпукло-вогнутая 22
- двояковогнутая 22
- двояковыпуклая 21
- из тросов 21
- кольцевая 14
- контурная 140
- наклонная 109
- плоская 108, 121, 152
- подстропильная 116
- пространственная 28, 121
- рыбовидная 22, 60
- трехгранная 60, 70, 121
- цилиндрическая 26
- Яверта 23
- Фиксация нитей в вантовой сети 51
- Фонарь зенитный 125
- световой 48, 62, 73
- Форма всякого покрытия 14, 28, 37, 54, 56
- здания в плане 5, 40, 54, 106, 138, 139
- мембранной оболочки 61
- стержневой плиты 111
- Формообразование поверхности покрытия 14, 37, 49, 111, 136, 141
- Фрикционный слой 71
- Фундамент анкерный 21, 42, 48, 66, 70, 74
- Хвостовик на конце ванты 79, 100
- Хоккейный стадион в Нью-Хейвене (США) 46
- «Юханнесхоф» в Стокгольме (Швеция) 23
- Хомут в узле вантовой фермы 33, 35
- двойной в узле вантовой сети 51
- для крепления растяжки 34
- из стальной полосы 158
- одиночный в узле вантовой сети 51
- с «седлом» 51
- Центральная зона оболочки 168
- Центральный барабан 5, 25, 27, 29, 36, 49, 92
- угол 158, 179
- Центрирование силового потока 19
- Цирк с седловидным покрытием 5, 38
- Число старжней вдоль дуги свода 140, 142
- Шаг вант 11, 22, 27, 50, 63, 102
- диафрагм 148
- Шарнир 64, 71, 77
- Шарнирное крепление 33, 78
- Шар полый 120
- Швеллер гнутый 119
- прокатный 68, 116, 125
- Ширина складки 163, 182
- Экономическая эффективность покрытия 73, 132
- Экономичность конструкций 4, 12, 23, 61, 106, 107, 116
- Эллиптическая форма здания в плане 12, 14, 29, 38, 56, 65, 66, 70
- вырезов в мембране 64
- Эпюра материала 132
- усилий 133, 165, 166, 189, 172
- Эстетическая выразительность 4, 37, 105, 146
- Ячейка геометрически неизменяемая 142
- квадратная 39, 108, 112, 122, 142, 146, 151
- ромбическая 142, 144, 150, 152
- треугольная 37, 108, 112, 134, 142, 146, 152
- шестигонная 37, 49, 52, 108, 112, 122, 134, 142
- центральная 63
- четырехугольная 142

Предисловие	3
Раздел первый. Висячие покрытия	4
Глава I. Общие сведения	9
Глава II. Конструкции висячих оболочек	9
§ II.1. Покрытия с параллельными вантами	12
§ II.2. Покрытия с радиальными вантами	18
§ II.3. Устройство кровельного ограждения	20
§ II.4. Несущие узлы покрытий	21
Глава III. Конструкции двухъярусных покрытий	21
§ III.1. Покрытия с параллельными вантами	25
§ III.2. Покрытия с радиальными вантами	29
§ III.3. Устройство кровли	31
§ III.4. Основные узлы крепления вант	37
Глава IV. Конструкции покрытий с вантовыми сетями	37
§ IV.1. Формы покрытий и сетей	51
§ IV.2. Основные несущие узлы и методы натяжения сетей	51
Глава V. Конструкции струнных покрытий, покрытий с висячими фермами и балками, комбинированных и подвесных систем	54
§ V.1. Струнные покрытия	54
§ V.2. Покрытия с висячими фермами и балками	56
§ V.3. Комбинированные и подвесные системы	57
Глава VI. Мембранные покрытия	60
§ VI.1. Основные положения	60
§ VI.2. Стабилизация мембран	61
§ VI.3. Узлы и детали мембранных покрытий	70
Глава VII. Восприятие распора в висячих покрытиях	73
§ VII.1. Опорные конструкции	73
§ VII.2. Анкерные фундаменты	75
§ VII.3. Анкерные крепления вант	75
Глава VIII. Основы расчета вантовых и мембранных покрытий	80
§ VIII.1. Основные положения	50
§ VIII.2. Усилия в висячих оболочках с радиальными вантами	81
§ VIII.3. Усилия в висячих оболочках с радиальными вантами	84
§ VIII.4. Усилия в двухъярусных покрытиях с параллельными вантами	87
§ VIII.5. Усилия в двухъярусных покрытиях с радиальными вантами	89
§ VIII.6. Усилия в покрытиях с вантовыми сетями	92
§ VIII.7. Подбор сечений несущих элементов висячих оболочек и вантовых покрытий	94
§ VIII.8. Основы расчета мембран	95
Глава IX. Примеры расчета	97
§ IX.1. Висячая оболочка с параллельными вантами	97
§ IX.2. Шатровое покрытие	98
§ IX.3. Двухъярусное покрытие с параллельными вантами	100
§ IX.4. Покрытие с вантовой сетью и опорным контуром из двух взаимно пересекающихся арок	102
§ IX.5. Сферическое мембранное покрытие	104
Раздел второй. Решетчатые пространственные конструкции	105
Глава X. Общие сведения	105
Глава XI. Перекрестно-стержневые конструкции	107
§ XI.1. Типы плит	108
§ XI.2. Конструктивная характеристика плит	111
§ XI.3. Опирающие стержневые плиты	113
§ XI.4. Конструкция стержней и узлов	115
§ XI.5. Устройство кровли	125
§ XI.6. Определение усилий в плитах	126
Глава XII. Конструкции сетчатых оболочек	136
§ XII.1. Формы оболочек	136
§ XII.2. Образование поверхности сетчатых оболочек	142
§ XII.3. Основные положения по устойчивости сетчатых оболочек	146
§ XII.4. Конструктивные решения одноярусных оболочек	148
§ XII.5. Конструктивные решения двухъярусных оболочек	151
§ XII.6. Устройство кровли по оболочкам	153
§ XII.7. Расчет усилий в своде	158
§ XII.8. Расчет усилий в складке	162
§ XII.9. Расчет усилий в куполе	164
§ XII.10. Расчет усилий в пологой оболочке	167
§ XII.11. Расчет усилий в гипаре	170
§ XII.12. Подбор сечений стержней и расчет узлов	173
Глава XIII. Примеры расчета	174
§ XIII.1. Стержневая плита из пентаэдров	174
§ XIII.2. Стержневая плита из тетраэдров	177
§ XIII.3. Сетчатый свод	179
§ XIII.4. Решетчатые складки на криволинейном плане	182
§ XIII.5. Двухъярусная сетчатая купол	184
§ XIII.6. Сетчатая пологая оболочка	185
§ XIII.7. Сетчатый четырехлепестковый гипар	187
Приложение 1. Расчетные сопротивления стали и ее соединений	189
Приложение 2. Расчетные сопротивления алюминиевых сплавов и их соединений	189

Приложение 3. Расчетные сопротивления болтов на растяжение, срез и механические свойства высокопрочных болтов	190
Приложение 4. Сортамент болтов с метрической резьбой (стандарты СЭВ 180-75, 182-75)	190
Приложение 5. Коэффициент ϕ продольного изгиба центрально-сжатых элементов	191
Приложение 6. Профили стальные оцинкованные гнутые с трапецевидной формой гофра для строительства по ТУ 34-13-5914-79 и ТУ 36-1929-76	191
Приложение 7. Профили стальные оцинкованные гнутые с трапецевидной формой гофра для строительства по ТУ 67-199-78	192
Приложение 8. Сортамент профилированных листов из алюминиевых сплавов	193
Приложение 9. Трубы стальные электросварные (выборка из ГОСТ 10704-76)	194
Приложение 10. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные (выборка из ГОСТ 8732-78)	198
Приложение 11. Профили стальные гнутые замкнутые квадратные по ТУ 14-2-361-79	203
Приложение 12. Сортамент стержневой горячекатаной арматурной стали периодического профиля по ГОСТ 5781-75 для всяких покрытий	205
Приложение 13. Канаты стальные для всяких покрытий	205
Список литературы	207
Предметный указатель	211

АНАТОЛИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ ТРУЩЕВ

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

Редакция литературы по градостроительству и архитектуре

Зав. редакцией Т. Н. Федорова

Редактор М. А. Гузман

Мл. редактор В. В. Цалина

Технический редактор Ю. Л. Циханкова

Корректор Е. Д. Рагулина

ИБ № 2986

Сдано в набор 18.10.82.

Формат 60×90/16.

Печ. л. 13,5

Тираж 34000 экз.

Бумага тип. № 2

Усл. печ. л. 13,5

Изд. № 1-9189

Подписано в печать 16.12.82.

Гарнитура «Литературная»

Усл. кр.-отт. 13,75

Заказ № 482

Т-21544

Печать высокая.

Уч.-изд. л. 16,15

Цена 55 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Подольский филиал ПО «Периодика» Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательства,
полиграфии и книжной торговли
г. Подольск, ул. Кирова, д. 25